

Ing. Norbert Mair

**Erzielbare Oberflächenqualitäten beim Planfräsen
mit einstellbarem Diamantfräs Werkzeug**

D I P L O M A R B E I T

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät: Maschinenbau

Mittweida, 2011

Ing. Norbert Mair

**Erzielbare Oberflächenqualitäten beim Planfräsen mit
einstellbarem Diamantfräswerkzeug**

eingereicht als

D I P L O M A R B E I T

an der

H O C H S C H U L E M I T T W E I D A (F H)

U N I V E R S I T Y O F A P P L I E D S C I E N C E S

Fakultät: Maschinenbau

Fulpmes, 2011

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Siegmund Ziller

Zweitprüfer: Prof. Dipl. Ing. Josef Alber

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Widmung

Diese Arbeit ist meiner toleranten Familie gewidmet.

Danksagung

Besonderer Dank gilt der Firma Metall Kofler, welche mich bestens bei den Fräsversuchen und den Messungen unterstützt hat. Mein Dank gilt auch der Firma Tirotool und hier im besonderen Herrn Ing. Gerhard Krösbacher für seine praxisorientierte Hilfestellungen. Der Firma PS-Fertigungstechnik danke ich für die Möglichkeit Bezugsflächenmessungen durchzuführen und für die Benutzung des Messmikroskopes.

Danken möchte ich meinem Betreuer Dipl. Ing. Josef Alber von der HTL Fulpmes und meinem betreuenden Hochschulprofessor Prof. Dr. Siegmund Ziller für die Hilfestellung während der Erstellung der Arbeit.

Zudem möchte ich mich auch bei meinen Arbeitskollegen bedanken, die meine Fehlstunden während des Studiums supliert haben und ganz besonders bei Herrn Direktor HR. Mag. Schvienbacher, der wesentlichen Anteil daran hat, dass diese Ausbildungsmöglichkeit an der HTL Fulpmes angeboten wird.

Besonders danken will ich auch meiner Frau Elke, für ihre Geduld und Nachsicht in den letzten beiden Jahren.

Bibliographische Beschreibung

Mair, Norbert:

Erzielbare Oberflächenqualitäten beim Planfräsen mit einstellbarem Diamantfräswerkzeug.

– 2011 – 97 S. Fulpmes, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit, 2011

Referat

Angesichts der wirtschaftlichen Forderungen, die Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu steigern und trotzdem die geforderten Oberflächenqualitäten umzusetzen, wurde ein neuartiges einstellbares Kassettenfräswerkzeug entwickelt. Dieses Fräswerkzeug ermöglicht die Planlaufeinstellung der Schneiden mit einer Genauigkeit von einem tausendstel Millimeter und sollte in Verbindung mit speziellen Diamantschneiden eine Qualitäts- und Leistungssteigerung bieten.

Ziel dieser Arbeit soll in erster Linie einer praxistauglichen Aussage über den Zusammenhang zwischen Planlaufeinstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Schneidkantenausführung und verschiedener erreichbarer Oberflächenkennwerte sein.

Zusätzlich soll der Einflüsse von Wuchtqualität, Schnittgeschwindigkeit und einer Bearbeitung ohne Kühlmittel geprüft werden.

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung	II
Referat	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Diagrammverzeichnis	VIII
Anhang	IX
1. Einleitung	1
1.1 Auswahl des Themas.....	1
1.2 Allgemeine Problematik	1
1.3 Zielsetzung.....	2
2. Fräsen	4
2.1 Planfräsen	4
2.1.1 Feinfräsen.....	5
2.1.2 Entstehung der Oberflächenform	5
2.1.3 Theoretische Rautiefe	6
2.1.4 Breitschlichtschneide.....	7
2.1.5 Wirkung der Schnittkräfte beim Feinfräsen	8
2.1.6 Fräsen mit Spindelsturz.....	8
3. Rauheit von Oberflächen	10
3.1 Einflussgrößen der Rauheit auf technische Eigenschaften	12
3.2 Oberflächenmesstechnik - Tastschnittverfahren	12
3.2.1 Tastspitze	15
3.2.2 Taster.....	16
3.2.3 Kufen-Tastsystem.....	16
3.2.4 Bezugsebenen-Tastsystem	17
3.3 Gestaltabweichungen	18
3.3.1 Unterscheidung der Gestaltabweichungen im Tastschnittverfahren.....	19
3.3.2 Mechanischer Filter	20
3.3.3 Elektrischer Profilfilter.....	22
3.3.4 Einfluss der Messbedingungen	28
3.3.5 Einstellen der Taststrecke	29
3.3.6 Grenzwellenlänge.....	29
3.4 Übersicht über die Kenngrößen.....	31
3.3.7 Wesentliche Rauheitskenngrößen	31
3.5 Erreichbare Rauheit von Oberflächen	40

4. Eingesetztes Fräswerkzeug.....	42
4.1 Verwendeter Schneidstoff.....	42
4.1.1 Ausführung der Schneidkante	44
4.2 Einstellvorgang	46
4.3 Werkzeugvoreinstellung.....	47
4.4 Werkzeugwuchten	48
5. Fräsversuch	49
5.1 Fräsprobe.....	49
5.2 Festgelegte Parameter auf den Fräsproben.....	50
6. Oberflächenmessgeräte.....	52
6.1 Bezugsebenen-Tastgerät S2	52
6.2 Kufen-Tastgerät M2	53
7. Oberflächenprüfung	54
7.1 Kennwerte Kufen-Tastsystem.....	54
7.1.1 Vergleich Ra, Rz und Rmax	54
7.1.2 Vergleich der Rz Werte unterschiedlicher Proben	58
7.2 Profilanalyse Bezugsebenen-Tastsystem.....	60
7.2.1 Profilanalyse, Mehrzahnfräser.....	60
7.2.2 Profilvergleich Bezugsebenen-Tastsystem – Kufen-Tastsystem	65
7.2.3 Kennwertvergleich Bezugsebenen-Tastsystem, Kufen-Tastsystem	68
7.2.4 Theoretische Berechnung der Kufenabsenkung	69
7.2.5 Theoretische Berechnung der Profiltiefe	70
7.2.6 Vergleich der theoretischen Profiltiefe mit den gemessenen Werten	74
7.2.7 Profilanalyse, Fräsen mit der Breitschlichtplatte	79
7.2.8 Tragfähigkeit des Profils	81
7.3 Gegenüberstellung wesentlicher Kennwerte	82
8. Messunsicherheit	83
9. Erkenntnisse und Diskussion der Messergebnisse	85
9.1 Einflüsse durch den Fräsprozess	85
9.2 Aussagekraft der Oberflächenkennwerte	87
10. Ausblick und Potentiale.....	88
Normen	90
Anhang	i
Literaturverzeichnis	96
Eidesstattliche Erklärung	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Planfräsen	4
Abbildung 2: Stirnfräsen, Seitenansicht und Grundriss	4
Abbildung 3: Schneidspuren auf Werkstückoberfläche	5
Abbildung 4: Erzeugte Oberflächenform beim Planfräsen mit einer Radiusplatte.....	6
Abbildung 5: Rautiefe bei planer Nebenschneide	6
Abbildung 6: Wirkung der Breitschlichtplatte	7
Abbildung 7: Ausrichtung der Breitschlichtplatte	7
Abbildung 8: Der Sturz verändert den Einstellwinkel κ	8
Abbildung 9: Der Sturz verändert die Ausrichtung der Nebenschneide	9
Abbildung 10: Ausgleich des Spindelsturzes durch eine ballige Nebenschneide	9
Abbildung 11: Rugotest Vergleichsmessung	10
Abbildung 12: Oberfläche, ein komplexes 3D Gebilde	10
Abbildung 13: Drehfläche periodische Profil	11
Abbildung 14: Kokillenguss, aperiodisches Profil	11
Abbildung 15: Oberflächenmessplatz	12
Abbildung 16: Tastschnittverfahren.....	13
Abbildung 17: Erfassung der Oberflächenkennwerte aus dem Profilschnitt.....	13
Abbildung 18: Profilausschnittes mit üblichen Überhöhungen und ohne Überhöhungen.....	14
Abbildung 19: Tastspitze.....	15
Abbildung 20: Öffnungswinkel im Profilverlauf.....	15
Abbildung 21: Querschnitt eines induktiven Oberflächentasters	16
Abbildung 22: Einkufen-Tastsystem.....	16
Abbildung 23: Zwei-Kufen-Tastsystem	17
Abbildung 24: Bezugsebenen-Tastsystem.....	17
Abbildung 25: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach DIN 4760	18
Abbildung 26: Unterscheidung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung	19
Abbildung 27: Übersicht der Filter.....	20
Abbildung 28: Filterwirkung der Kufe	20
Abbildung 29: Maximale mechanische Filterung durch die Kufe	21
Abbildung 30: Vergrößerung der Welligkeit durch die Kufe	21
Abbildung 31: Direktes Profil.....	22
Abbildung 32: Trennung Lang- und kurzwelliger Profilanteile.....	23
Abbildung 33: Filterarten	23
Abbildung 34: Filterwirkung	24
Abbildung 35: Gewichtsfunktion des phasenkorrekten Gaußfilters (DIN EN ISO 11562)	25
Abbildung 36: Übertragung bei der Grenzwellenlänge von 0,8mm	26
Abbildung 37: Übertragungskurve eines Hochpassfilters	26
Abbildung 38: Übertragungskurve eines Tiefpassfilters.....	27
Abbildung 39: Übertragungscharakteristik bei unterschiedlichen Profiltfiltern	28
Abbildung 40: Messstrecke l_t , l_n	29
Abbildung 41: Profilveränderungen durch unterschiedliche Grenzwellenlängen	30
Abbildung 42: Verfälschung der Rauheit durch zu klein gewählten Wellenfilter	30
Abbildung 43: Bestimmen der maximalen Rautiefe R_{max}	32
Abbildung 44: Übersicht Rauheitskennwerte R_{max} , R_z	33
Abbildung 45: Bestimmen der Einzel - Grundrautiefe R_{3z}	34
Abbildung 46: Bestimmen der Einzel-Glättungstiefen R_{pi} , $i=1,...,5$	34
Abbildung 47: Zusammenhang zwischen R_p , R_v und R_z	35
Abbildung 48: Bestimmen des arithmetischen Mittenrauhwerts R_a	35
Abbildung 49: Bestimmen der Profiltiefe P_t	36
Abbildung 50: Der Einfluss einzelner Profilsitzen auf P_t	37
Abbildung 51: Konstruktion der Abbott-Firestone Kurve.....	37
Abbildung 52: Auswertung der Materialanteilkurve nach DIN EN ISO 13565-2	38
Abbildung 53: Bestimmen der Kenngrößen R_{PK} und R_{VK} nach DIN EN ISO 13565-2.....	39
Abbildung 54: Erreichbare Rauheit von Oberflächen.....	40
Abbildung 55: Korrelation R_z und R_a	41
Abbildung 56: Fräswerkzeug mit Steilkegel	42

Abbildung 57 CVD Ronde roh und poliert	43
Abbildung 58 Querschliff CVD–D Dickschicht	43
Abbildung 59 Feinstgelaserte Schneidkante	43
Abbildung 60: Radiusplatte	44
Abbildung 61: Werkstattmikroskop	44
Abbildung 62: Breitschlichtplatte	45
Abbildung 63: Korrektur der Breitschlichtplatte	45
Abbildung 64: Kassette mit Messerkopf, Feineinstellung	46
Abbildung 65 Zoller V4001	47
Abbildung 66 Vermessung der Breitschlichtplatte	47
Abbildung 67: Wuchtvorgang	48
Abbildung 68: Fräsprobe bei der Bearbeitung	49
Abbildung 69: Fräsprobe mit Stufen bei der Messung	50
Abbildung 70: Bezugsflächenmessung S2	52
Abbildung 71: Bezugsflächentaster	52
Abbildung 72: Kufen-Tastsystem	53
Abbildung 73: Kufentaster Geometrie	53
Abbildung 74: Profil Probe 21 Vorschub 0,15mm/Z	60
Abbildung 75: Fehler Spindelachse - Werkzeugachse	61
Abbildung 76: Mängel der Steilkegelaufnahme	62
Abbildung 77: Hohlshaftkegelaufnahme	62
Abbildung 78: Überlagerung von Schwingungen	63
Abbildung 79: Frässhwingung	63
Abbildung 80: Schwingungen bei unterschiedlichen Drehzahlen	64
Abbildung 81: Profil und Kennwerte Probe 21 Vorschub 0,15mm/Z	65
Abbildung 82: Profilverzerrung Kufen-Tastsystem	66
Abbildung 83: Überhöhung beim Kufen-Tastsystem zum Bezugsebenen-Tastsystem	67
Abbildung 84: Kreisabschnitt Berechnung (Tabellenbuch 2006, 28)	69
Abbildung 85: Kufenversatz	69
Abbildung 86: Zusammenhang Vorschub/U mit der Profiltiefe	70
Abbildung 87: Zusammenhang Planlauf Profiltiefe	71
Abbildung 88: Berechnung des maximalen Zahnschlages	72
Abbildung 89: Probe 21 Stufe 1; Oberflächenbildung $f_z = 0,075\text{mm}$, $f = 0,45\text{mm/U}$	74
Abbildung 90: Probe 21 Stufe 7; Oberflächenbildung $f_z = 0,2\text{mm}$, $f = 1,2\text{mm/U}$	75
Abbildung 91: Auf Weitung des Profils	75
Abbildung 92: Werkzeugvermessung Probe 21	76
Abbildung 93: Probe 003 Stufe 7; $f_z = 0,2\text{mm/Z}$, $f = 1,2\text{mm/U}$	77
Abbildung 94: Probe 003 Stufe 5; $f_z = 0,15\text{mm/Z}$, $f = 0,9\text{mm/U}$	77
Abbildung 95: Werkzeugvermessung - Probe 003	78
Abbildung 96: Breitschlichtplatte Profil 41 Stufe 5 Bezugsflächentastung	79
Abbildung 97: Breitschlichtplatte Profil 41 Stufe 5 Kufen-Tastsystem	79
Abbildung 98: Vergleich P-Profil - R-Profil	80
Abbildung 99: Kalibriermessung	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erläuterungen zur Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	3
Tabelle 2: Auswirkungen der Gestaltabweichungen Ordnung 1 bis 4	18
Tabelle 3: Wahl der Grenzwellenlänge DIN EN ISO 4288.....	29
Tabelle 4: Oberflächenkennwerte Übersicht mit Norm	31
Tabelle 5: Messwerte Schneidkantenradius	44
Tabelle 6: Fräsproben; Vorschubstufen und Vorschubgeschwindigkeiten	51
Tabelle 7: Fräsproben; Einsatzbedingungen	51
Tabelle 8: Fräspröbe; 21008	51
Tabelle 9: Vergleich Bezugsebenen-Tastsystem - Kufen-Tastsystem	66
Tabelle 10: Absenkung der Gleitkufe	70
Tabelle 11: Theoretische Profiltiefe in Abhängigkeit vom Schneidplattenradius	71
Tabelle 12: Planschlag B des nächsten Zahnes Z2 ohne Einfluss auf die Oberfläche	72
Tabelle 13: Planschlag B des übernächsten Zahnes Z3 ohne Einfluss auf die Oberfläche	73

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Probe22 Ra, Rz, Rmax.....	54
Diagramm 2: Probe 42 Ra, Rz, Rmax.....	55
Diagramm 3: Probe003 Ra, Rz, Rmax.....	55
Diagramm 4: Probe 531 Ra, Rz, Rmax.....	56
Diagramm 5: Probe 11 Ra, Rz, Rmax.....	56
Diagramm 6: Probe004 Ra, Rz, Rmax.....	57
Diagramm 7: Vergleich Probe22 und 42	58
Diagramm 8: Vergleich Probe 22, 11, 004	58
Diagramm 9: Vergleich Probe 003, 531	59
Diagramm 10: Probe 21 Vergleich Pt Kufen-Tastsystem – Bezugsebenen-Tastsystem	68
Diagramm 11: Probe 21 Vergleich Rz Kufen-Tastsystem – Bezugsebenen-Tastsystem	68
Diagramm 12: Vergleich Theoretische Profiltiefe mit den Messwerten	74
Diagramm 13: Vergleich der Profiltiefen Probe Breitschichtplatte	80
Diagramm 14: Probe 42 Vergleich Kufen-Tastsystem - Bezugsebenen-Tastsystem.....	81
Diagramm 15: Vergleich der Tragfähigkeit Probe 21 mit 41	81
Diagramm 16 Vergleich Ptheoretisch, Pt, Rz Kufen- und Rz Bezugsebenen-Tastsystem.....	82

Anhang

Anhang 1: Oberflächenmesswerte Kufen-Tastsystem.....	i
Anhang 2: Oberflächenprofile Kufen-Tastsystem	v
Anhang 3: Oberflächenmesswerte Bezugsebenen-Tastsystem	ix
Anhang 4: Daten Werkzeugeinstellung.....	xix
Anhang 5: Unwuchtmessprotokoll.....	xxi

1. Einleitung

1.1 Auswahl des Themas

Aufgrund privater Kontakte mit Herrn Ing. Michael Kofler und Herrn Ing. Gerhard Krösbacher bin ich auf die Problemstellung Oberflächenkennwerte beim Fräsen mit einem neuartigen, einstellbaren Fräswerkzeug gestoßen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Oberflächenkennwerten und gefrästen Flächen, bei unterschiedlichen Einstellungen, ist derzeit nicht gegeben.

Da ich an der HTL Fulpmes im Messlabor unterrichte und auch Oberflächenprüfungen durchführe, hat mich das Thema interessiert und bietet mir die Möglichkeit mein Wissen in diesem Bereich zu vertiefen. Neben diesem Vorteil war es für mich wesentlich möglichst eine Arbeit mit Praxisbezug zu erstellen.

Da ich an einer Schule unterrichte und keine „Firmeninternen Themen“ zur Verfügung habe, bin ich der Fa. Kofler und der Fa. Tiroltool sehr dankbar für diese Aufgabenstellung.

1.2 Allgemeine Problematik

Die Fa. Tiroltool Werkzeugsystem GmbH stellt Präzisionswerkzeuge mit Diamantschneiden her. Als Partner für die Herstellung der Grundkörper ist die Fa. Metall Kofler in Fulpmes tätig. Vor ca. 2 Jahren wurde ein Fräswerkzeug mit einstellbaren Kassetten entwickelt. Dieser Werkzeugtyp sollte in Verbindung mit Diamantschneidplatten neue Möglichkeiten im Bereich Oberflächenqualität am Werkstück bieten.

Eine wesentliche Aussage für den Anwender und Verkäufer ist natürlich eine Aussage, welche Oberflächenqualitäten erreichbar sind. Derzeit wird über Fräsversuche die Oberflächenqualität ermittelt.

Im Fertigungsbetrieb ist die Zeit für Fräsversuche sehr begrenzt. Sollte das Ergebnis dieser Versuche nicht den gewünschten Erfolg bringen, ist dieser Aufwand sowohl für den möglichen Kunden als auch für den Verkäufer nicht gerechtfertigt.

Derzeit gibt es keine Möglichkeit, erreichbare Oberflächenqualitäten vorab einzuschätzen.

Die erzielbare Oberflächenqualität hängt natürlich von vielen verschiedenen Einflussgrößen ab. Diese Einflüsse, im Speziellen die Schneidkantenausführung und die Planeinstellung, sollten untersucht werden.

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Aussage, welche Oberflächenqualität bei unterschiedlichen Schnittwerten und Werkzeugeinstellungen mit dem einstellbaren Diamantfräswerkzeug erreicht werden kann.

Diese Zielsetzung bezieht sich auf praxisgerechte sehr günstige Werkstattbedingungen.

Als „günstige Werkstattbedingung“ werden eine stabile Werkzeugmaschine mit neuwertiger Hauptspindellagerung und ein hochwertiges Werkzeugvoreinstellgerät mit Bildverarbeitung verstanden.

Negative Einflüsse durch Schwingungen, Verschleiß, Nachschnitte oder instabile Verhältnisse sollen soweit wie möglich reduziert werden um erreichbare Werte zu erhalten.

Die Oberflächenprüfung sollte vorwiegend im Tastschnittverfahren mit dem Kufen-Tastsystem. Diese Prüfgeräte haben sich im Werkstattbereich durchgesetzt und sind direkt an der Maschine, sehr einfach, einsetzbar.

1.4 Aufbau der Arbeit

In der Einleitung wurde soeben kurz auf die Problematik und die Ziele eingegangen. Im Folgenden werden die Grundlagen der betreffenden Fachgebiete erörtert.

Dies beginnt im 2. Abschnitt mit der Beschreibung des Planfräsens im 3. Abschnitt erfolgt die Beschreibung der Rauheitsmessung.

Nachdem die Grundlagen diskutiert wurden, wird der praktische Teil der Arbeit behandelt.

Nach der Beschreibung des eingesetzten Fräswerkzeuges im 4. Abschnitt wird der Fräsversuch im 5. Abschnitt erklärt.

Anschließend werden die verwendeten Oberflächenprüfgeräte beschrieben und die Messwerte interpretiert. (Abschnitt 6 bis 7)

Im Abschnitt 8. wird die Messunsicherheit betrachtet, im Abschnitt 9 werden die Erkenntnisse zusammengefasst und diskutiert.

Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen wird im 10. Abschnitt ein Ausblick mit möglichen Potentialen gegeben.

Die nachfolgende Darstellung verdeutlicht den Aufbau dieser Diplomarbeit und die eben beschriebene Vorgehensweise.

1. Einleitung, allgemeine Problematik und Zielsetzung		
2. Fräsen 3. Rauheit von Oberflächen	4. Eingesetztes Fräswerkzeug 5. Fräsversuche 6. Oberflächenmessgeräte S2, M2 7. Oberflächenprüfung 8. Messunsicherheit	9. Erkenntnisse und Diskussion der Ergebnisse
Theoretischer Teil	Praktischer Teil	Ergebnis
10. Ausblick und Potentiale		

Tabelle 1: Erläuterungen zur Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

2. Fräsen

Beim Fräsen werden ebene Flächen oder Konturen hergestellt. Bei jeder Umdrehung des Fräasers folgt auf den Eingriff der Schneiden der Austritt aus dem Werkstück. Durch den unterbrochenen Schnitt schwanken die Schnittkraft und Temperatur an der Schneide. (Europa Fachbuchreihe 2007, S. 154)

Nach DIN8589.3 werden 3 Verfahren unterschieden: Stirnfräsen, Stirnumfangsfräsen und Umfangsfräsen. Nach der Werkstückform wird das Stirnfräsen auch als Planfräsen bezeichnet. Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit wird ausschließlich das Planfräsen behandelt.

2.1 Planfräsen

Beim Planfräsen steht die Werkzeugachse senkrecht zur Werkstückoberfläche.

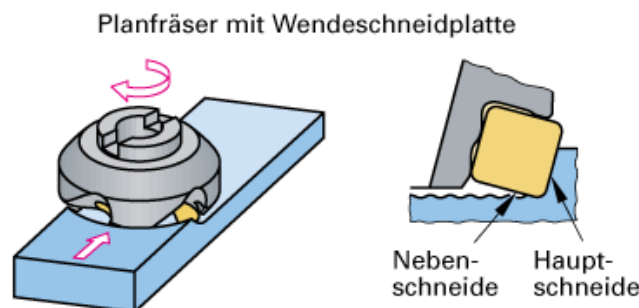
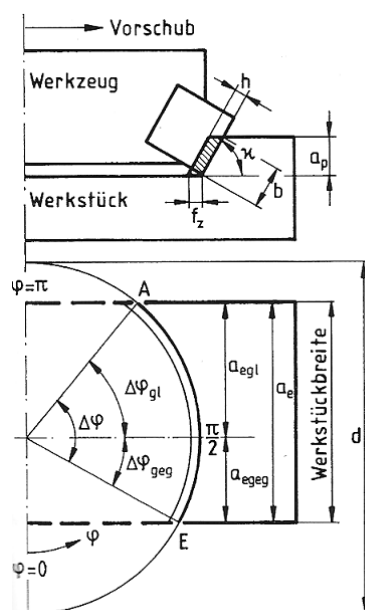


Abbildung 1: Planfräsen

Die Spanungsdicke ändert sich und ist vom Vorschub pro Zahn dem Eingriffswinkel φ und dem Einstellwinkel κ abhängig.



Stirnfräsen. Seitenansicht und Grundriss

κ	Einstellwinkel
h	Spanungsdicke
f_z	Vorschub pro Schneide
a_p	Schnitttiefe
b	Spanungsbreite
$\Delta\varphi$	Gesamteingriffswinkel
a_e	Eingriff
a_{egl}	Gleichlaufeingriff
a_{egeg}	Gegenlaufeingriff

Abbildung 2: Stirnfräsen, Seitenansicht und Grundriss

2.1.1 Feinfräsen

Unter Feinfräsen wird die feine Endbearbeitung ebener Flächen verstanden. Die Toleranzen für die Ebenheit liegen bei 0,02 bis 0,001mm. Die Abweichungen bei Welligkeit und Rauheit sind kleiner als beim normalen Planfräsen und konkurrieren vor allem mit dem Planschleifen. Die Werkzeuge können Planfräsköpfe mit einstellbaren Schneiden, mit einer Breitschichtplatte oder Einzahnfräser sein. (Paucksch 2008, S. 223)

2.1.2 Entstehung der Oberflächenform

Die Oberfläche wird durch die Schneidecken und die Nebenschneide der Schneidplatten erzeugt. Es entstehen bogenförmige Bearbeitungsspuren, welche durch die Überlagerung der Werkzeugdrehung und des geradlinigen Vorschubes entstehen. Sie haben den mittleren Abstand des Schneidenvorschubes f_z voneinander.

Unregelmäßigkeiten des Abstandes entstehen hauptsächlich durch den Radialschlag der einzelnen Schneiden.

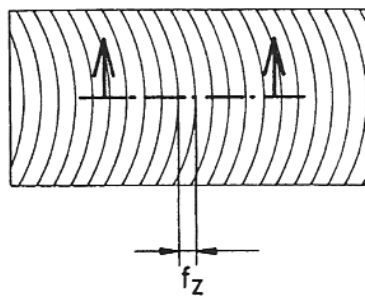


Abbildung 3: Schneidspuren auf Werkstückoberfläche

Die größte Auswirkung auf die erzeugte Oberflächenqualität ergibt sich durch folgende Einflüsse. (Paucksch 2008, S. 224)

- Die Schneideckenform
- Der Axialschlag der Schneiden
- Die Ausrichtung der Nebenschneide
- Statische und dynamische Verformungen des Bearbeitungssystems durch wechselnde Zerspanungskräfte

2.1.3 Theoretische Rautiefe

Die Schneideckenform (Eckenformtiefe...e) und der Axialschlag (a) beeinflussen die Oberfläche und ergeben eine Theoretische Rautiefe R.

$$R=e+a \quad (\text{Glng.1})$$

e.....Eckenformtiefe (μm)

a.....Axialschlag (μm)

es gilt:

$$e = \frac{f_z^2}{8r} \quad (\text{Tabellenbuch 2006, 303}) \quad (\text{Glng.2})$$

f_zVorschub pro Zahn (mm/Z)

r.....Schneideckenradius (mm)

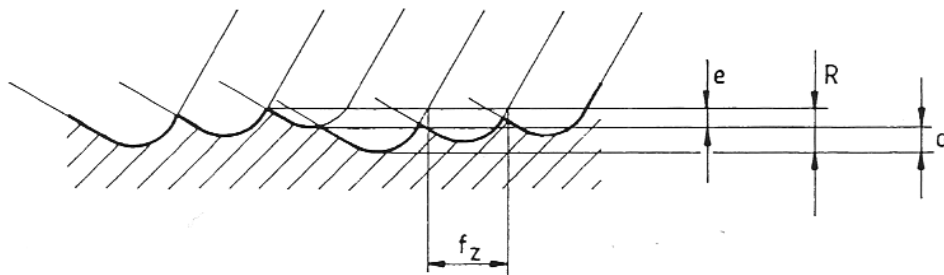


Abbildung 4: Erzeugte Oberflächenform beim Planfräsen mit einer Radiusplatte

Bei einer planen Nebenschneide würde die Theoretische Rautiefe direkt vom Planlauf abhängen. ($R = a$)

$$R = a$$

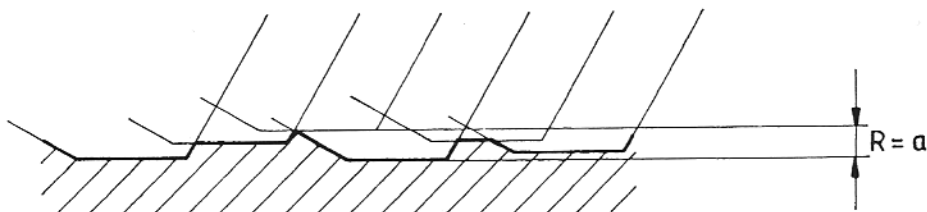


Abbildung 5: Rautiefe bei planer Nebenschneide

2.1.4 Breitschlichtschneide

Vollständig ausschalten kann man den Axialschlag durch den Einsatz einer Breitschlichtschneide. Diese steht 0,03mm – 0,05mm über die anderen Schneiden heraus, besitzt eine besonders lange Nebenschneide und arbeitet damit alle anderen Schneidspuren weg. Die aktive Länge der Nebenschneide muss den ganzen Vorschub pro Umdrehung abdecken.

$$f = f_z \times z \quad (\text{Tabellenbuch 2006, 300}) \quad (\text{Glng. 3})$$

f Vorschub/U (mm/U)

f_z Vorschub/Zahn (mm/Z)

z Zähnezahl

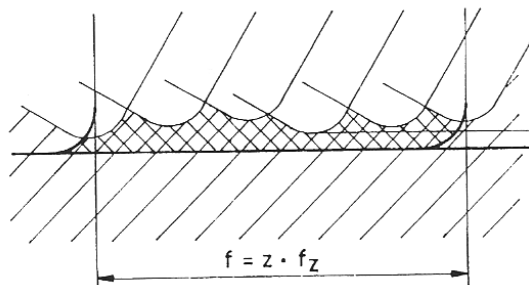


Abbildung 6: Wirkung der Breitschlichtplatte

Die Breitschlichtplatte wird 0,03 bis 0,05mm vorgestellt.

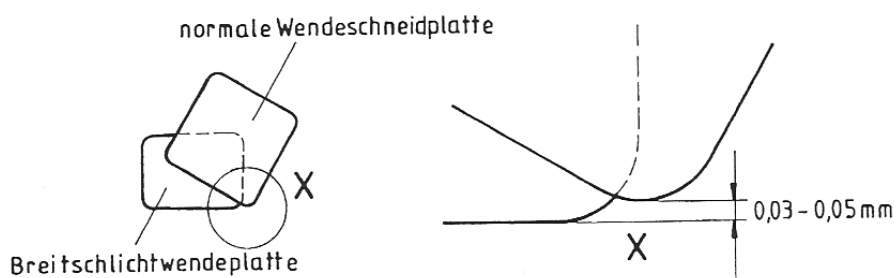


Abbildung 7: Ausrichtung der Breitschlichtplatte

Aus zerspanungstechnischer Sicht ergibt sich eine hohe Passivkraft aufgrund der großen Eingriffslänge der Breitschlichtplatte. Vor allem bei Freiflächenverschleiß verstärkt sich die Passivkraft, zusätzlich ergibt sich die Problematik des exakten Ausrichtens der Schneide zur Oberfläche. (Paucksch 2008, S. 231)

Ähnliche Ergebnisse wie mit einer Breitschlichtplatte sind mit Einzahnfräser erreichbar.

2.1.5 Wirkung der Schnittkräfte beim Feinfräsen

Die Zerspanungskräfte F_c (Schnittkraft), F_f (Vorschubkraft) und F_p (Passivkraft) haben statische Verformungen und eine Schwingungsanregungen zur Folge. In unserem Fall spielt aufgrund der geringen Spantiefe und der geringen Materialfestigkeit von Al 99,5, Zugfestigkeit unter 100N/mm^2 eine sehr untergeordnete Rolle. (Paucksch 2008, S. 230)

Beim Feinfräsen sind vor allem die Kräfte klein zu halten, dies wird auf folgende Weise erreicht:

- kleiner Vorschub pro Zahn
- kleine Schnitttiefe
- positiver Spanwinkel
- vergrößerte Schnittgeschwindigkeit

2.1.6 Fräsen mit Spindelsturz

Toleranzbedingt ergibt sich bei der Hauptspindel eine Schrägstellung der Spindelachse zur Tischführung, dem Spindelsturz. Je nach Vorschubrichtung entstehen auf der Werkstückoberfläche Kreuzspuren. Die Wendepplatten schneiden auf dem Rückweg nach. Kreuzspuren sind beim Fräsen unerwünscht, einerseits ergibt sich kein regelmäßiges Oberflächenbild, andererseits schadet der rückwärtige Eingriff mit geringer Schnitttiefe den Schneiden. Diese stumpfen schnell ab, weil die Schnitttiefe zu klein ist um einen richtigen Span zu ergeben. Dies führt zu mehr Reibung und Erhitzung als beim normalen Schnitt. (Paucksch 2008, S. 227)

Da moderne Bearbeitungszentren keine Möglichkeit der Spindelausrichtung haben, ist jene Fräsrichtung zu bevorzugen, bei der es zu keinem Nachschnitt kommt.

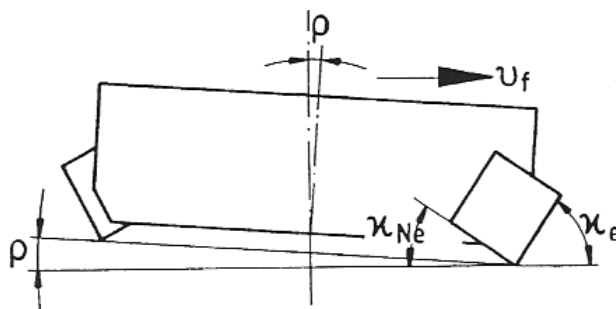


Abbildung 8: Der Sturz verändert den Einstellwinkel κ

Der Spindelsturz bewirkt eine Schrägstellung der Nebenschneide, eine Änderung der Einstellwinkel κ und eine Beeinflussung der Oberflächenqualität.

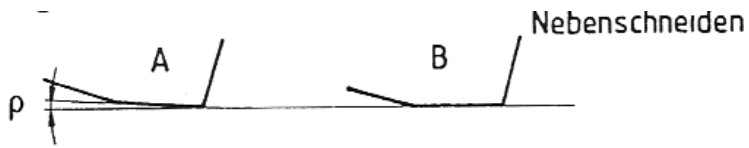


Abbildung 9: Der Sturz verändert die Ausrichtung der Nebenschneide

Durch den Einsatz einer balligen Nebenschneide kann der Spindelsturz am elegantesten kompensiert werden.

Der Radius soll zwischen 1000 und 3000mm betragen. (Paucksch, S. 228)



Abbildung 10: Ausgleich des Spindelsturzes durch eine ballige Nebenschneide

3. Rauheit von Oberflächen

Überall dort, wo Oberflächenstrukturen Einfluss auf die Funktion, die Bearbeitung oder das Aussehen von Bauteilen oder Erzeugnissen haben, ist eine sorgfältige Oberflächenprüfung von großer Bedeutung. Anfang des 20. Jahrhunderts waren die Fachleute noch auf ihr Sehvermögen und ihren Tastsinn angewiesen. Ein geübtes Auge erkennt zwar Merkmale im μm -Bereich und auch die oft belächelte Fingernagelprobe lieferte Ergebnisse, es handelt sich aber um subjektive Aussagen.

Als Oberflächenvergleichstest bietet der sog. Rugotest eine Möglichkeit mittels Fingernagel eine Aussage zu treffen.

Dieser Vergleichstest ist aber ebenso subjektiv und liefert keine Messwerte.

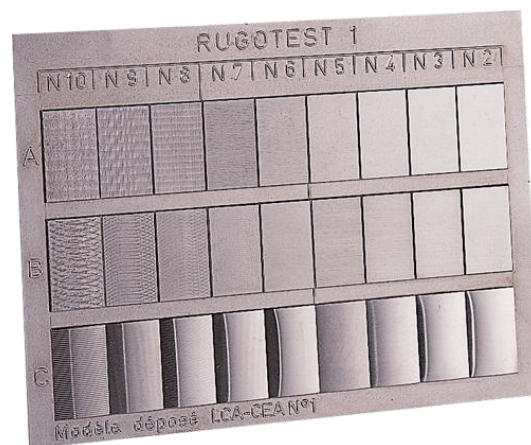


Abbildung 11: Rugotest Vergleichsmessung

Genauer betrachtet ist jede Oberfläche ein komplexes Gebilde welches, sich nicht so ohne weiteres auf Kennwerte reduzieren lässt.

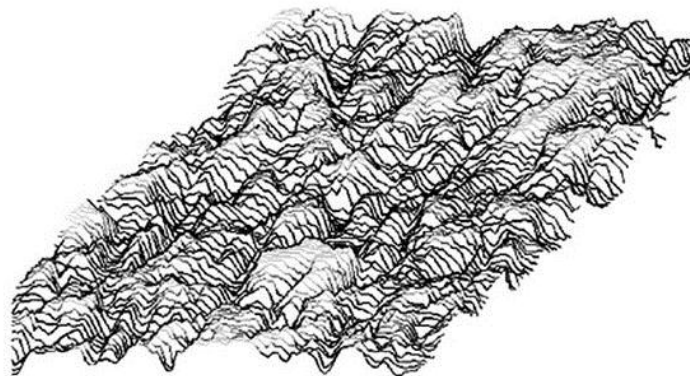


Abbildung 12 Oberfläche, ein komplexes 3D Gebilde

Grundsätzlich kann man bei dieser Feinstruktur der Oberfläche aber 2 verschieden markante Ausprägungen feststellen. Durch die Herstellung entstehen entweder regelmäßige (periodische) Profile oder unregelmäßige (aperiodische) Profile. (Volk 2005, 5)
Periodische Profile entstehen z.B. beim Drehen und Hobeln, aperiodische Profile z.B. beim Schleifen, Honen, Kugelstrahlen, Gießen.

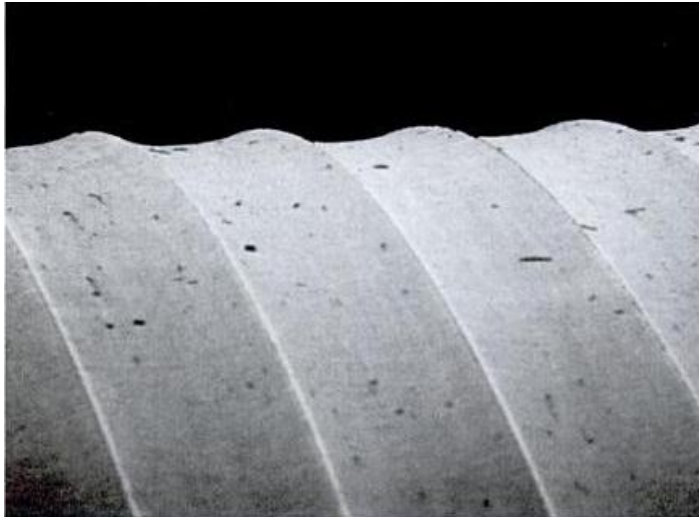


Abbildung 13: Drehfläche periodische Profil



Abbildung 14: Kokillenguss, aperiodisches Profil

3.1 Einflussgrößen der Rauheit auf technische Eigenschaften

Die Rauheit von Oberflächen beeinflusst eine Vielzahl von technischen Eigenschaften.

(Mahr GmbH 2002, 2.1.1)

- Reibungs- und Verschleißeigenschaften
- Dichtungs- und Paarungseigenschaften
- Strömungsverhalten
- Wärmeübertragung
- Elektrische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Lackierbarkeit
- Umformbarkeit
- Tragfähigkeit, Belastbarkeit
- ...

3.2 Oberflächenmesstechnik - Tastschnittverfahren

Es gibt heute viele Möglichkeiten Oberflächenmessungen durchzuführen z.B.: Raster-Elektronenmikroskope, Weißlichtsensoren, Streulichtmessgeräte, Optische Autofokus-Taster usw. In der Industrie werden Oberflächenprofile aber überwiegend mit dem Tastschnittverfahren erfasst (DIN ISO 3274). Dieses Verfahren hat sich aufgrund der einfachen Bedienbarkeit, der Kosten und vieler genormter Kenngrößen durchgesetzt.

Ein solcher Oberflächenmessplatz besteht aus einer Werkstückaufnahme, dem Messtaster, einem Vorschubgerät, einem Messständer und dem elektronischen Steuer-, Mess- und Auswertegerät.

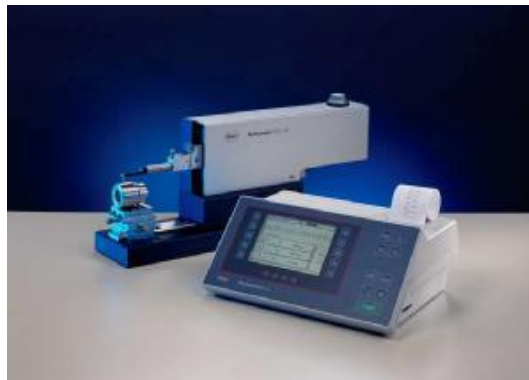


Abbildung 15: Oberflächenmessplatz

Zum Messen der Oberfläche wird eine genormte Taststrecke mit eine Diamantspitze abgefahren.

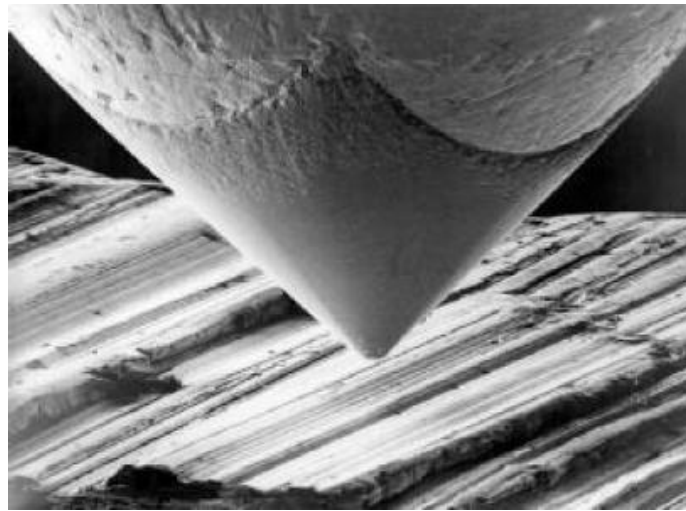


Abbildung 16: Tastschnittverfahren

Es ist zwar nicht erforderlich, die gesamte tolerierte Werkstückfläche messtechnisch zu erfassen. Es ist aber zu beachten, dass die Rauheitsmessung quer zur Bearbeitungsrichtung erfolgen muss. (Mahr GmbH 2002, 2-4)

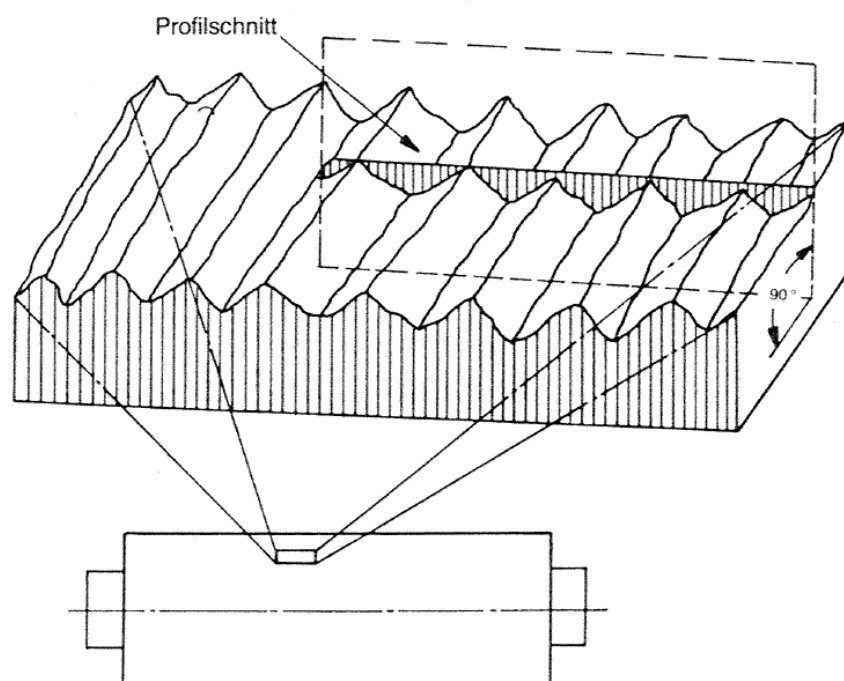


Abbildung 17: Erfassung der Oberflächenkennwerte aus dem Profilschnitt

Laut DIN EN ISO 4288 soll die Oberflächenmessung an einem Werkstück dort vorgenommen werden, wo die höchsten Werte zu erwarten sind (was oft visuell feststellbar ist).

Bei der Betrachtung von Profildigrammen ist zu beachten, dass nur ein Tastschnitt, eben ein kleiner Ausschnitt der Oberfläche betrachtet wird.

Wesentlich ist die Tatsache, dass der Vertikalmaßstab weitaus größer ist als der Horizontalmaßstab. Die Überhöhung kann z.B. 500fach sein, dies ist notwendig um nicht meterlange Diagramme zu erhalten und die Spitzen und Täler zu erkennen.

„Dadurch entsteht aber eine Profilverzerrung welche die Oberfläche wie steile Alpentäler erscheinen lassen, in Wirklichkeit sind technische Oberflächen eher glatt und erinnern mehr an die norddeutsche Tiefebene“. (Rauheitsmessung - Theorie und Praxis, 72)

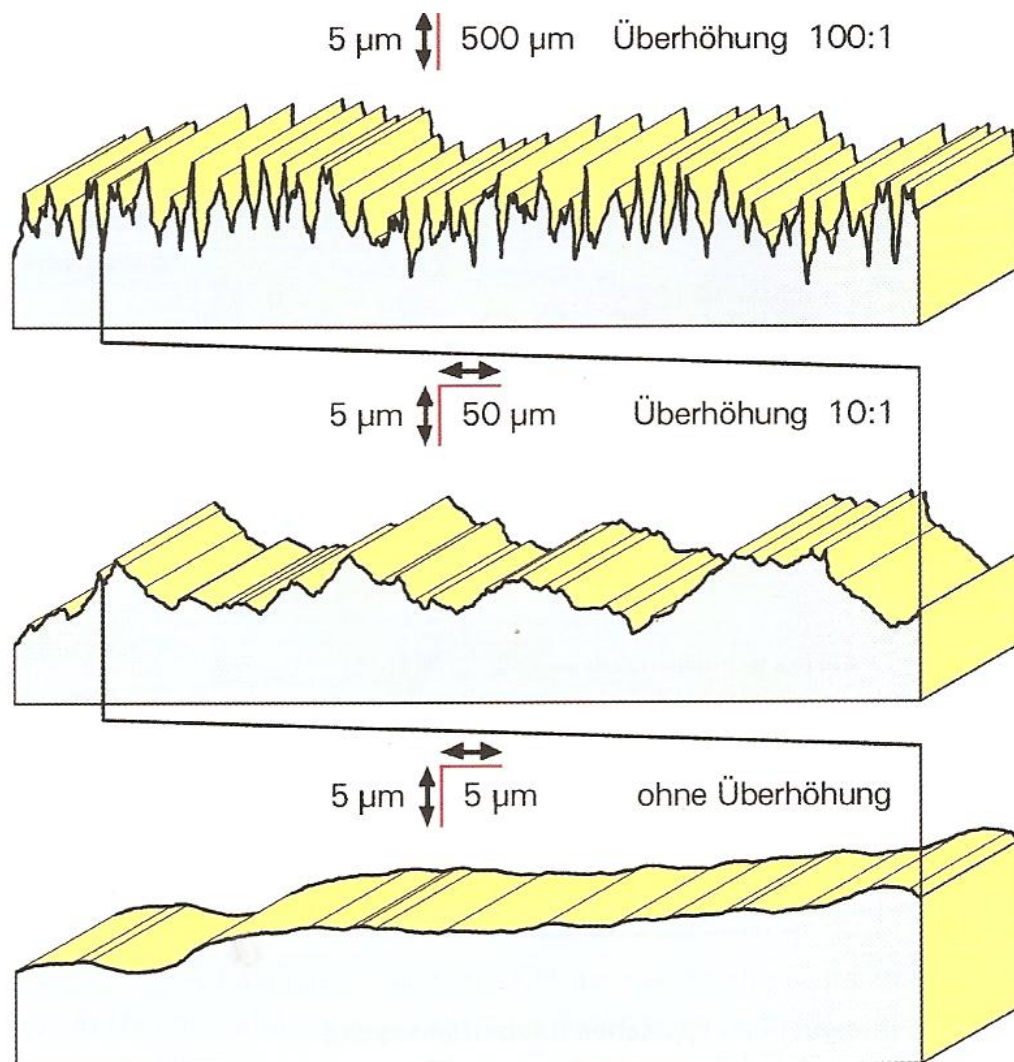


Abbildung 18: Profilausschnittes mit üblichen Überhöhungen und ohne Überhöhungen

Zum Verständnis werden nun die wesentlichen, an der Messung beteiligten, Elemente beschrieben.

3.2.1 Tastspitze

Ein wesentlicher Bestandteil der Messkette ist die Tastspitze.

Die Tastspitze besitzt einen Radius von 5μ und einem Spitzenwinkel von 85° . Für Sonderfälle, wo sehr steile Flanken untersucht werden müssen sind ein Radius von 2μ und ein Spitzenwinkel von 60° möglich. Die Messkraft beträgt $0,8\text{mN}$ (DIN4772).

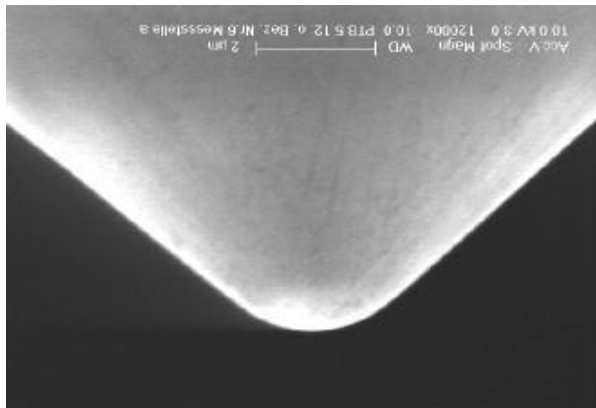


Abbildung 19: Tastspitze

Bei mechanisch bearbeiteten Oberflächen (wie Drehen, Schleifen, Fräsen) entstehen Rauheitsprofile, deren Öffnungswinkel größer als 120° ist. (Lemke 1992, 109)

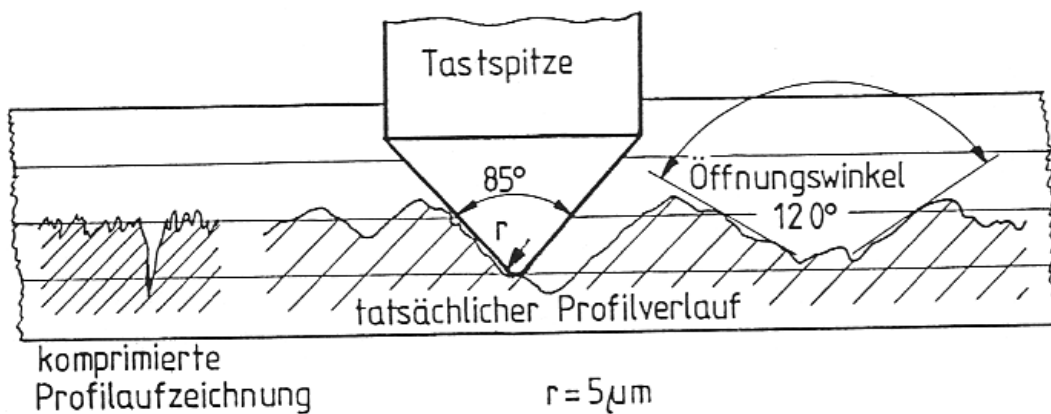


Abbildung 20: Öffnungswinkel im Profilverlauf

3.2.2 Taster

Im Taster befinden sich eine hochpräzise Lagerung der Tastspitze und der Wandler, der die Vertikalbewegung der Tastspitze in ein elektrisches Signal umsetzt.

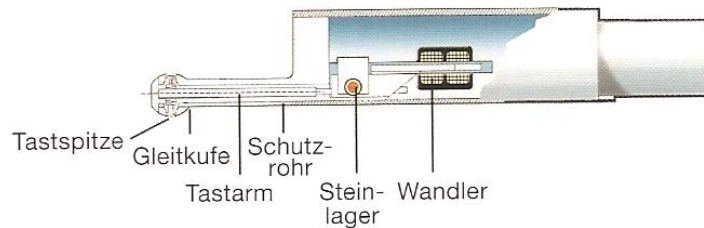


Abbildung 21: Querschnitt eines induktiven Oberflächentasters

Es werden zwei unterschiedliche Tastsysteme eingesetzt.

3.2.3 Kufen-Tastsystem

Beim Kufen-Tastsystem stützt sich mit einer Kufe (Einkufen-Tastsystem) auf der zu messenden Oberfläche ab.

Mit Kufen-Tastsystemen wird nur die Relativbewegung der Tastspitze zur Gleitkufe gemessen.

Vorteile: einfache Ausrichtung des Tastsystems, schwingungsunempfindlich, werkstatthaft, günstige Geräte

Nachteil: Profilverfälschungen bei größeren Wellenlängen. (Sander 1993, 89)

Eine genaue Untersuchung der Profilverfälschung erfolgt im Abschnitt 3.3 Messtechnische Erfassung der Gestaltabweichungen

Eine übliche Ausführung ist das Einkufen-Tastsystem kurz Kufen-Tastsystem.

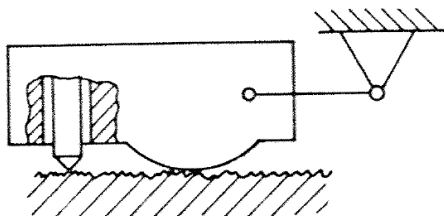


Abbildung 22: Einkufen-Tastsystem

Eine Sonderform stellt das Zweikufen-Tastsystem dar. Dieses System wird in der Blechindustrie eingesetzt, weil eine große Prüffläche zur Verfügung steht.

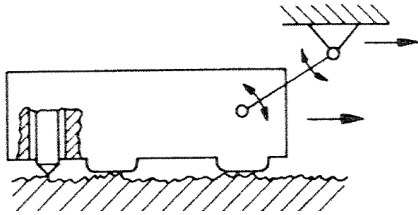


Abbildung 23: Zwei-Kufen-Tastsystem

3.2.4 Bezugsebenen-Tastsystem

Beim Bezugsebenen-Tastsystem (auch Freitastsystem) wird das Messsystem auf einer nahezu idealen Bezugsfläche im Vorschubgerät ausgerichtet.

Diese Messreferenz muss zur Oberfläche des Werkstückes ausgerichtet werden. Gemessen wird die Relativbewegung zwischen Tastspitze und Bezugsfläche. (Europa Fachbuchreihe 2007, 38)

Vorteile: das Oberflächenprofil wird unverfälscht übertragen

Nachteil: Ausrichteaufwand und Schwingungsempfindlichkeit

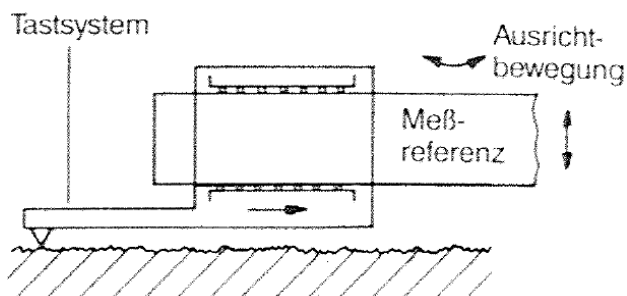





Abbildung 24: Bezugsebenen-Tastsystem

3.3 Gestaltabweichungen

Da es keine ideale Oberfläche gibt (absolut Eben), wurden verschiedene Abweichungen dieser Idealform definiert. Die Einteilung dieser Abweichungen, die sog. Gestaltabweichungen, sind zum Verständnis der Oberflächenmessung erforderlich.

Gestaltabweichung	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung : Formabweichung 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits-, Abweichung	- Fehler in den Führungen d. Werkzeugmaschine - Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes - falsche Einspannung des Werkstückes
2. Ordnung : Welligkeit 	Wellen	- außermittige Einspannungen - Form der Laufabweichungen eines Fräasers - Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung : Rauheit 	Rillen	- Form der Werkzeugschneide - Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs
4. Ordnung : Rauheit 	Riefen Schuppen Kuppen	- Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide)

Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung überlagern sich zu der Istoberfläche

Beispiel:



Abbildung 25: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach DIN 4760

Verschiedene Auswirkungen können aufgrund der Gestaltabweichungen der Funktionalität zugeordnet werden. (Mahr GmbH 2002, 1.2.7)

- **Ordnung 1: Formabweichungen**
 - Erschwerte Montage, verringerte mechanische Belastbarkeit, ungleichmäßiger Bewegungsablauf, ungenügender Kontakt ...
- **Ordnung 2: Welligkeit**
 - Eigenschwingungen, Geräusche ...
- **Ordnung 3: Rauheit, periodischer Anteil**
 - Erhöhte Haft- und Gleitreibungskräfte, erhöhter Verschleiß, verringerte Lebensdauer, Geräusche ...
- **Ordnung 4: Rauheit, aperiodischer Anteil**
 - Erhöhte Haft- und Gleitreibungskräfte, erhöhter Verschleiß, verringerte Lebensdauer, ungenügender Kontakt ...

Tabelle 2: Auswirkungen der Gestaltabweichungen Ordnung 1 bis 4

3.3.1 Unterscheidung der Gestaltabweichungen im Tastschnittverfahren

Das im Tastschnitt erfasste Oberflächenprofil ist sozusagen der „Fingerabdruck“ des gesamten Bearbeitungsprozesses, dieses Profil wird als P-Profil (Primärprofil) bezeichnet. In ihm haben sämtliche Bearbeitungsschritte, denen das Werkstück unterworfen war, ihre Spuren hinterlassen. Aus der Fülle der im Profil enthaltenen Informationen ist es nun notwendig für die Funktion des Werkstücks und für die Steuerung des Bearbeitungsprozesses wichtige Informationen „herauszufiltern“.

Messtechnisch werden Gestaltabweichungen unterschiedlicher Ordnung durch (Profil-)Filter voneinander getrennt. Die Oberflächenmesstechnik befasst sich mit den mittleren und kurzwelligen Anteilen der Gestaltabweichungen von Werkstücken Ordnung 2 bis 4.

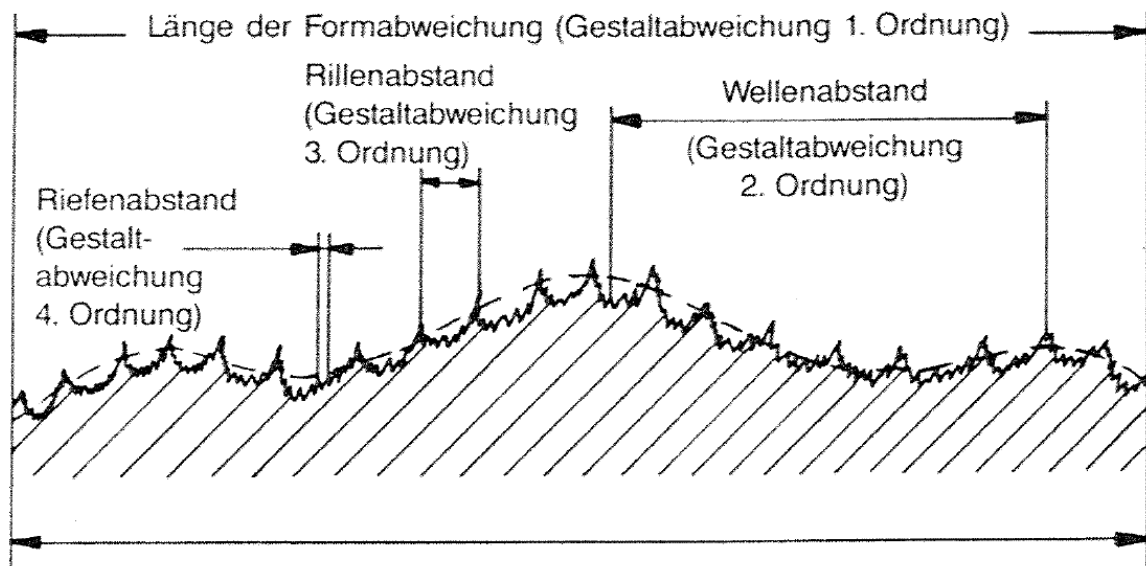


Abbildung 26: Unterscheidung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung

Darüber hinaus können auch die gewählten Messbedingungen Einfluss auf den Anteil der Gestaltabweichungen im Profil haben. Der Einfluss der Messbedingungen und die Auswirkung der Filter sind für die Interpretation der Oberflächenkennwerte wesentlich. Die Länge der Messstrecke und der Messtakt kann ebenso als Filter verstanden werden d.h. eine lange Messstrecke erfasst z. B. mehr Welligkeiten als eine kürzere Messstrecke.

Anschließend soll nochmals eine Übersicht der einzelnen Filter gegeben werden.

- **Mechanische Filter**
 - Tastspitze
 - Kufe¹
- **Elektrische Filter**
 - Gaußfilter DIN EN ISO 11562
 - As-Filter DIN EN ISO 3274
- **Messbedingungen**
 - Länge der Messstrecke
 - Messtakt

Abbildung 27: Übersicht der Filter

Die einzelnen Filter sollen nun besprochen werden.

3.3.2 Mechanischer Filter

a) Tastspitze

Die Tastspitze mit einem Radius von 2 oder 5µm bewirkt eine Filterung von sehr kurzwelligen Abweichungen. Diese Filterung kann nur durch die Änderung des Messsystems z.B. durch optische Verfahren ausgeschaltet werden.

b) Kufe

Beim Kufen-Tastsystem werden langwellige Anteile der Oberflächenstruktur herausgefiltert. Die Kufe folgt der langwelligen Formabweichung der Oberfläche. In unten angefügter Abbildung ist der Tastpunkt und der Kufengleitpunkt an derselben Stelle.

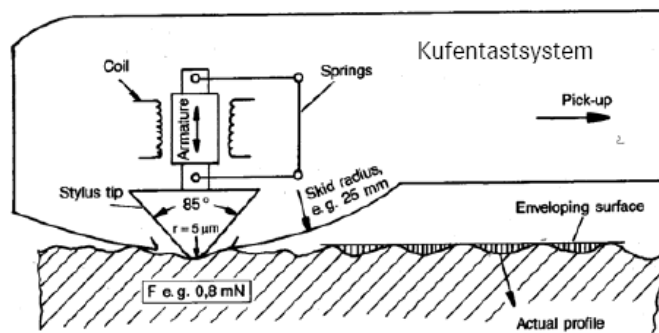


Abbildung 28: Filterwirkung der Kufe

¹ Nicht bei Bezugsebenen-Tastsystem

Sind der Tastpunkt und der Kufengleitpunkt versetzt kann es zu einer Überhöhung oder Verminderung der Welle kommen.

Wird die Wellenlänge der Oberfläche gleich groß wie der Abstand der Tastspitze zum Kufengleitpunkt, erfolgt eine völlige mechanische Filterung der Welle. (Sander 1993, 89)

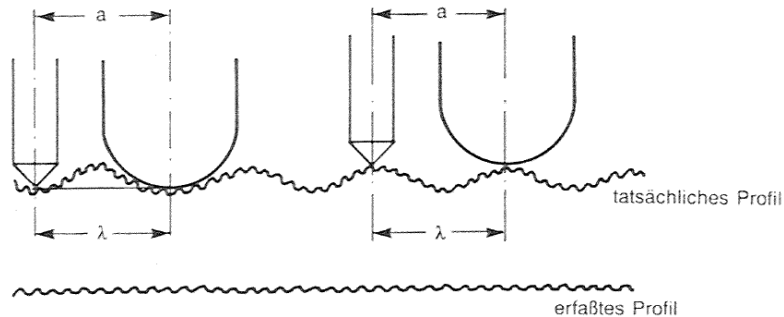


Abbildung 29: Maximale mechanische Filterung durch die Kufe

Entspricht der Abstand von der Tastspitze (a) zur Kufe dem halben Wellenabstand, so wird die Welligkeit mit dem Faktor 2 vergrößert.

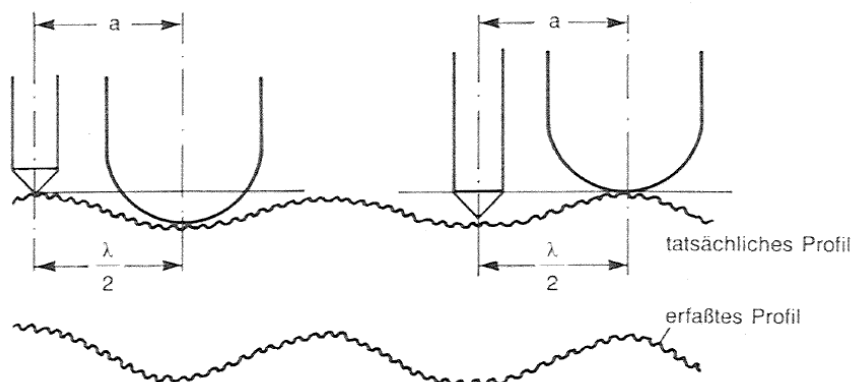


Abbildung 30: Vergrößerung der Welligkeit durch die Kufe

3.3.3 Elektrischer Profilfilter

a) Aufgabe des Filters

Die Aufgabe des elektrischen Filters ist das Primärprofil² in einen Rauheitsanteil³ und ein Welligkeitsanteil⁴ zu spalten.

Das erste Profil, welches vom Oberflächenprüfgerät ertastet wird, ist das direkte Profil⁵.

Dieses Profil ist ungerichtet. (Europa Fachbuchreihe 2007, 39)

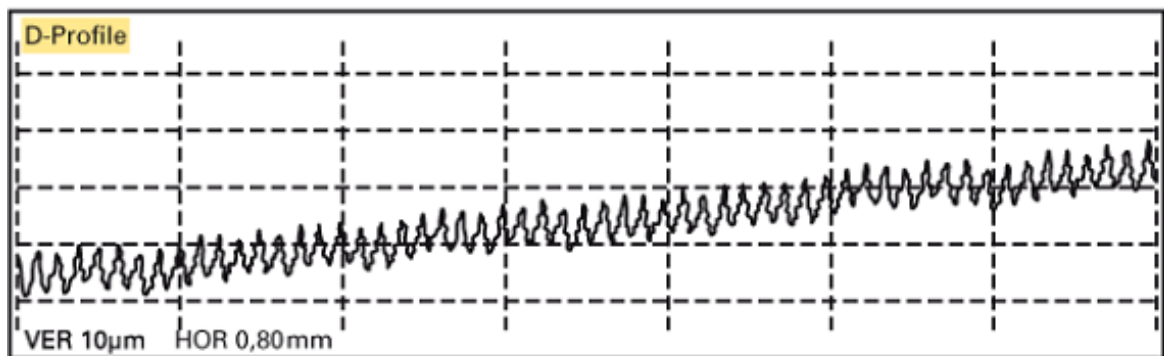


Abbildung 31: Direktes Profil

Das Primärprofil wird aus dem direkten Profil ermittelt. Beim Primärprofil wird eine Ausgleichsgerade gebildet. Die Bildung der Ausgleichsgerade erfolgt nach dem Verfahren der kleinsten Abweichungsquadrate. (Volk 2005, 104)

Diese Ausgleichsgerade bildet die Mitte des Primärprofiles (Ausrichtung des P Profils).

Als Primärprofil wird das gerichtete Profil mit allen Gestaltabweichungen verstanden. Die Grenzwellenlänge λ_c definiert den Übergang von der Rauheit zur Welligkeit. (DIN EN ISO 11562)

Der kurzwellige Anteil ist also der Rauheitsanteil (Gestaltabweichung 3 und 4 Ordnung), der langwellige Anteil ist der Welligkeitsanteil (Gestaltabweichung 2 Ordnung).

² P-Profil

³ R-Profil

⁴ W-Profil

⁵ D-Profil

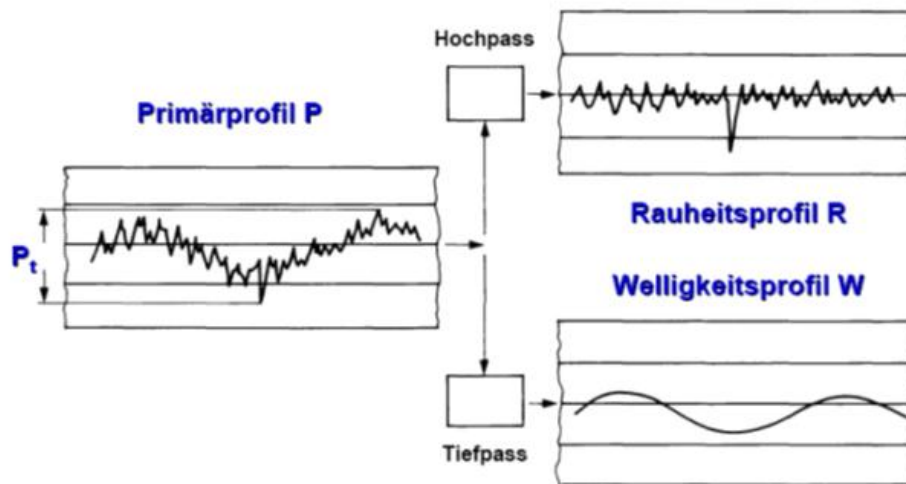


Abbildung 32: Trennung Lang- und kurzwelliger Profilanteile

Mittels eines Hochpassfilters wird die Welligkeit herausgefiltert, es bleibt das Rauheitsprofil übrig. Soll die Welligkeit ausgegeben werden, filtert ein Tiefpassfilter die Rauheitsanteile heraus. (Volk 2005, S. 122)

Nach der Norm sind Hochpassfilter und Tiefpassfilter zueinander komplementär. D.h. aus dem R-Profil und aus dem W-Profil lässt sich das Primärprofil durch einfaches Aufaddieren rekonstruieren. (Mahr GmbH 2002, 1.2.13)

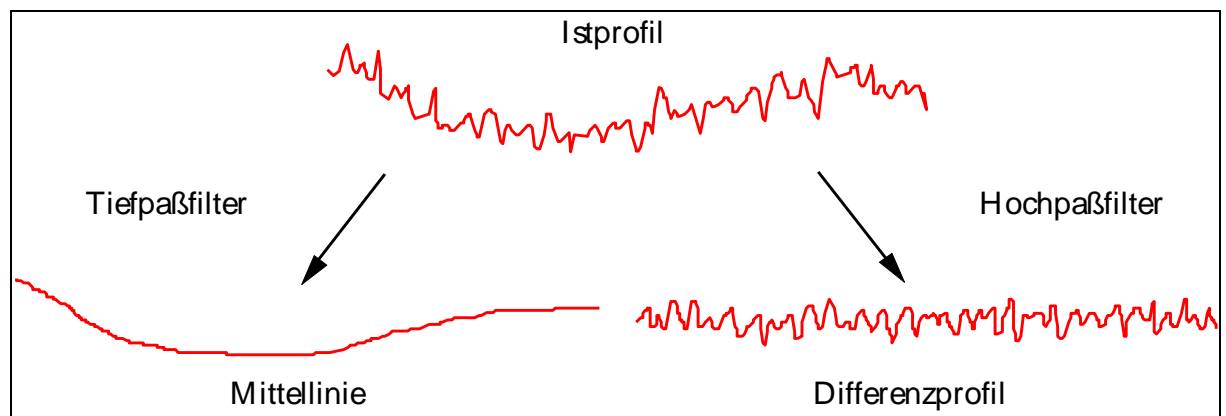


Abbildung 33: Filterarten

Die Wirkung des Filters auf das W und R Profil wird an dem Schleifprofil in der Abbildung unten deutlich ersichtlich.

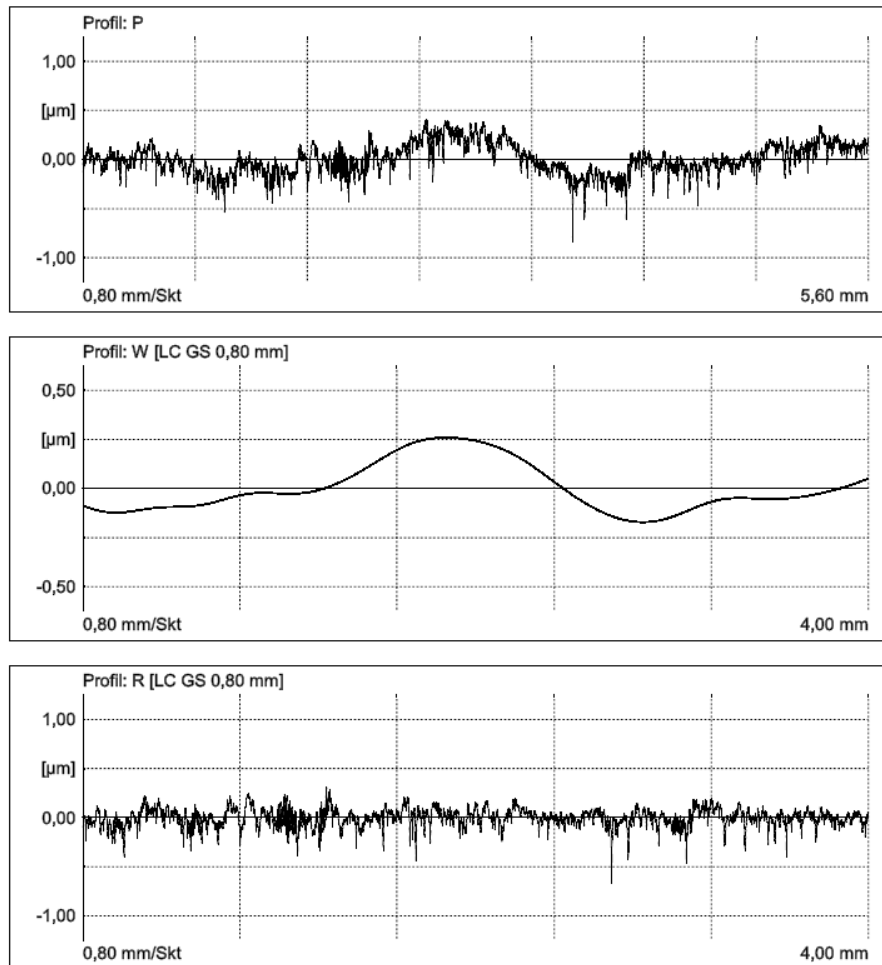


Abbildung 34: Filterwirkung

Diese Ausgleichsgerade dient zur Messung von Welligkeitsabweichungen im W-Profil. Im R-Profil legt der Profilfilter die mittlere Linie durch das Profil fest.

c) Bildung der Mittellinie

Die Mittellinie entsteht bei einem phasenkorrekten Filter, in dem für jede Stelle des Profils ein gewichteter Mittelwert gebildet wird. (DIN EN ISO 11562)

Die Bildung der Mittellinie für das R-Profil ist von der Grenzwellenlänge abhängig. Es wird ein schmales Fenster schrittweise über das ganze Profil verschoben. In jedem Abschnitt wird das gewichtete arithmetische Mittel der Ordinatenhöhe berechnet.

Die Anwendung der Gewichtsfunktion bedeutet, dass Riefen am Rande des Fensters weniger stark bewertet werden als solche in der Fenstermitte. Dies erreicht man dadurch, dass alle Ordinatenhöhen innerhalb des Fensters mit einem variablen Faktor multipliziert werden, der in der Mitte maximal ist und nach beiden Seiten entlang einer Gauß Kurve auf null abnimmt. Das Fenster orientiert sich an der Grenzwellenlänge.

Verbindet man diese Mittelwerte miteinander, dann erhält man die Profilmittellinie, wie sie vom Phasenkorrekten Filter gebildet wird.

Das Rauheitsprofil ergibt sich als Differenz zwischen ursprünglichem Profil und dieser Mittellinie. (Volk 2005, 125)

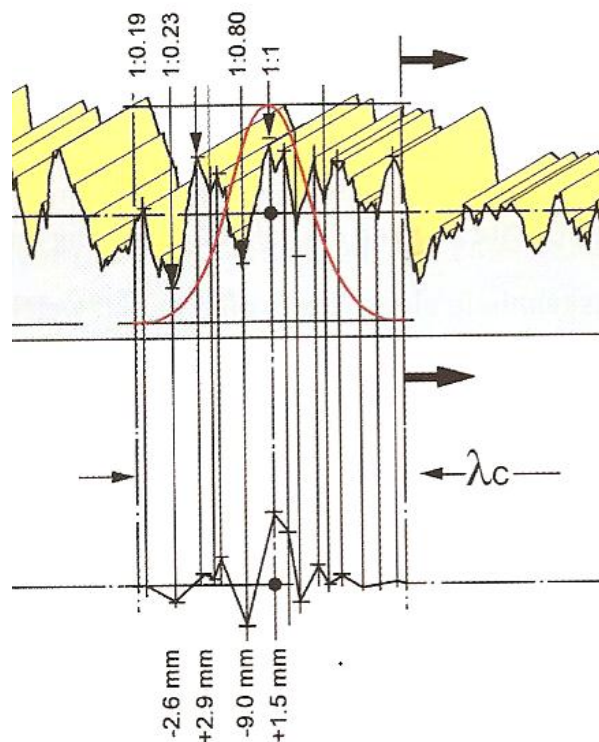


Abbildung 35: Gewichtsfunktion des phasenkorrekten Gaußfilters (DIN EN ISO 11562)

d) Wirkung des Filters

Folgende Beschreibung ist für den üblichen phasenkorrekten Gaußfilter (DIN EN ISO 11562) gültig, welcher seit 1990 eingesetzt wird.

Die Filterung ist ein mathematischer Prozess, den man sich folgendermaßen vorstellen kann. Jedes Profil lässt sich mathematisch eindeutig durch sein Spektrum ersetzen (Fourier Transformation). Das Profil wird dazu in eine Reihe von einzelnen Sinuskurven mit jeweils

steigenden Wellenzahlen aber individuellen Amplituden zerlegt. Werden alle Sinuskurven addiert, ergibt sich wieder das ursprüngliche Profil.

Die Grenze zwischen Rauheit und Welligkeit wird durch die Grenzwellenlänge bestimmt (vgl. 3.3.6).

Die Grenzwellenlänge ist jene Wellenlänge, bei welcher der Filter die Amplitude einer Sinuswelle auf 50% reduziert d.h. mit abnehmender Grenzwellenlänge nimmt die Amplitude des gefilterten Rauheitsprofils ab. Gleichzeitig nehmen die Amplituden des Welligkeitsprofils zu.

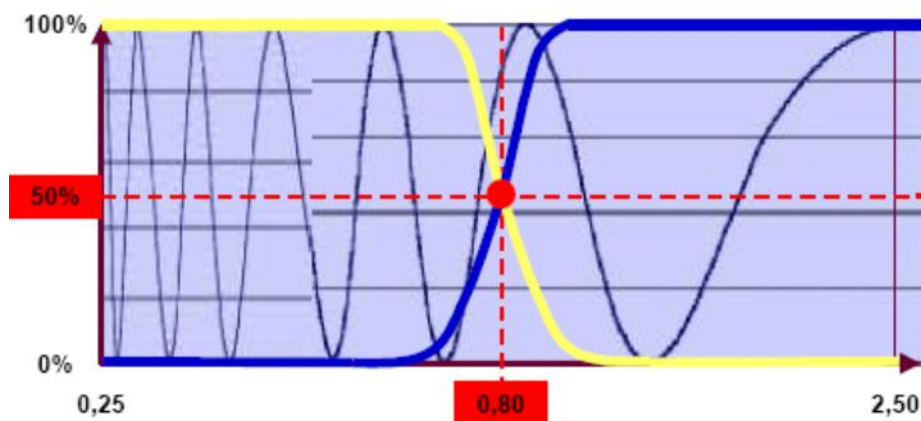


Abbildung 36: Übertragung bei der Grenzwellenlänge von 0,8mm

Die Übertragungskurven von Hochpass-Filtern sind dadurch gekennzeichnet, dass sie im kurzwelligen Bereich mit einer Übertragungsrate von fast 100% beginnen und für große Wellenlängen gegen Null gehen. (Rauheit)

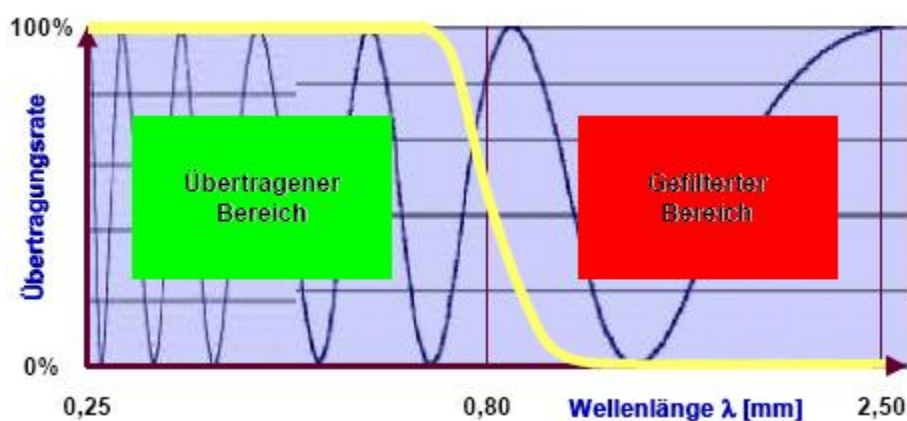


Abbildung 37: Übertragungskurve eines Hochpassfilters

Gerade umgekehrt verhält es sich bei einem Tiefpass-Filter. Die kurzwelligen Profilanteile werden herausgefiltert, die langwelligen Anteile zu fast 100% übertragen. (Welligkeit)

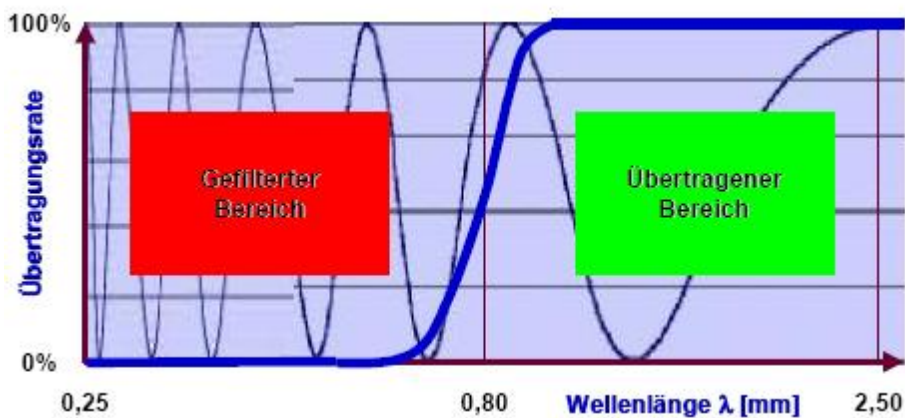


Abbildung 38: Übertragungskurve eines Tiefpassfilters

e) λ_s Filter

Abschließend sei noch nach der neuen Norm ISO 3274 der Tiefpassfilter mit sehr kleinen Wellenlängen λ_s angesprochen.

Sehr kleine Wellenlängen zwischen 30:1 und 300:1 von der Grenzwellenlänge werden ausgefiltert. Dieser Filter sollte Messfehler im Bereich sehr kurzer Wellenlängen ausgleichen. Diese können aus dem Bereich Radiusabweichungen bzw. Formabweichungen der Tastspitze kommen. Auch begrenzt er den Einfluss der Messelektronik im Bereich extrem kurzer Wellenlängen.

Der Filter kann automatisch vom Messgerät angewählt werden, ist aber umstritten wo Mindesttoleranzen gefordert sind. Der λ_s Filter kann abgewählt werden. (Mahr GmbH 2002, 1.2.31)

f) Wirkung der verschiedenen Profilfilter

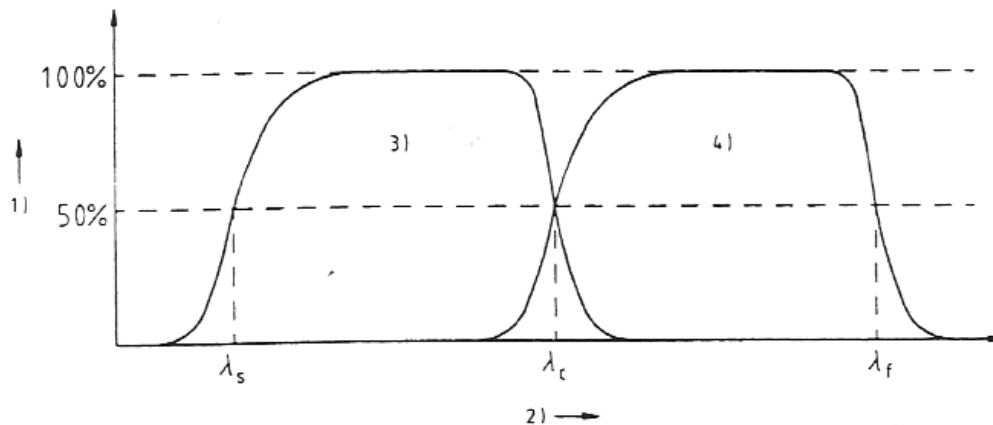


Abbildung 39: Übertragungscharakteristik bei unterschiedlichen Profilfiltern

Im Bereich 3 wird das Rauheitsprofil übertragen, im Bereich 4 das Welligkeitsprofil. Sehr kurze Wellenlängen können vom λ_s Filter ausgeblendet werden, lange Wellenlängen vom λ_f Filter. Das λ_f Filter kommt bei Formmessgeräten zum Tragen, beim Oberflächenprüfen sind die Messstrecken zu kurz. (Klein 2008, 688)

3.3.4 Einfluss der Messbedingungen

Die Länge der Messstrecke wirkt als Hochpassfilter: Je kürzer die Messstrecke, desto geringer ist der Anteil langwelliger Gestaltabweichungen im Profil.

Demgegenüber wirkt der Messtakt, d. h. der Abstand zweier aufeinanderfolgender Messpunkte als Tiefpassfilter. Auch in der Längenmesstechnik gilt das von der Theorie der elektrischen Signalübertragung her bekannte „Abtasttheorem“, welches besagt, dass die Abtastfrequenz, mit der eine periodische Schwingung erfasst werden soll, mindestens doppelt so groß sein muss wie die zu messende Schwingung. In der Längenmesstechnik hat die Praxis gezeigt, dass pro Wellenlänge nach Möglichkeit mindestens sieben Messpunkte erfasst werden sollten, um einen bestimmten Wellenanteil im Profil sicher messen zu können. (Mahr GmbH 2002, 1.2.29)

Gleichzeitig muss aber der Messtakt deutlich verkleinert werden, um die nach dem Abtasttheorem mindestens erforderliche Messpunktdichte zu erzielen.

3.3.5 Einstellen der Taststrecke

Die Messstrecke l_t oder l_m setzt sich aus 5 Einzelmessstrecken einer Vorlauf- und einer Nachlaufstrecke zusammen. Eine Einzelmessstrecke l_r oder l_e entspricht der Grenzwellenlänge λ_c .

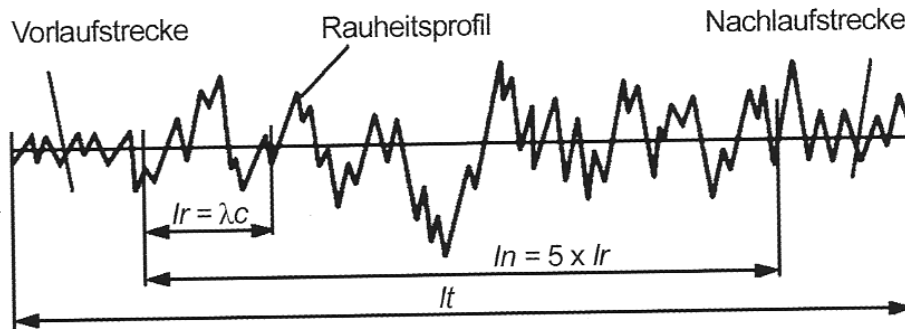


Abbildung 40: Messstrecke l_t , l_n

Die Gesamtstrecke (l_n) einer Messung ist immer das 5-fache der Grenzwellenlänge λ_c . (Jung 2010, 4)

3.3.6 Grenzwellenlänge

Die Grenzwellenlänge trennt Rauheitskennwerte von Welligkeitskennwerten (vgl. 3.3)

Wahl der Grenzwellenlänge				
DIN EN ISO 4288, ASME B46.1				
Periodische Profile	Aperiodische Profile		Grenzwellenlänge (Cutoff)	Einzel-/Gesamtmeßstrecke
R_{S_m} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	l_r / l_n (mm)
> 0,013 bis 0,04	bis 0,1	bis 0,02	0,08	0,08 / 0,4
> 0,04 bis 0,13	> 0,1 bis 0,5	> 0,02 bis 0,1	0,25	0,25 / 1,25
> 0,13 bis 0,4	> 0,5 bis 10	> 0,1 bis 2	0,8	0,8 / 4
> 0,4 bis 1,3	> 10 bis 50	> 2 bis 10	2,5	2,5 / 12,5
> 1,3 bis 4	> 50 bis 200	> 10 bis 80	8	8 / 40

Tabelle 3: Wahl der Grenzwellenlänge DIN EN ISO 4288

Die Grenzwellenlänge wird mithilfe der zu erwarteten Oberfläche eingestellt. Üblicherweise wird eine Probemessung mit λ_c 0,8mm durchgeführt und anschließend die Grenzwellenlänge eingestellt. Drehprofile und Hobelprofile gelten als periodische Profile und können aufgrund der Rillenbreite (Vorschub / Umdrehung) eingestellt werden. (Sander 1993, 79)

Die Grenzwellenlänge muss nach DIN EN ISO 4288 gewählt werden, ansonsten kommt es zu völlig unterschiedlichen Welligkeit bzw. Rauheitsprofilen.

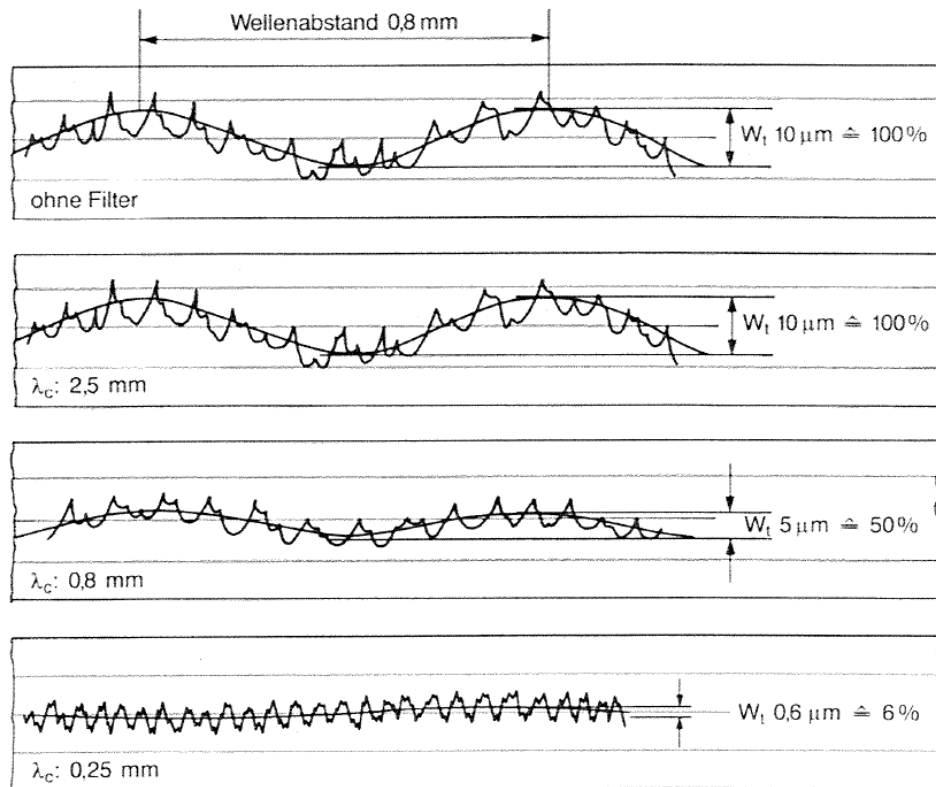


Abbildung 41: Profilveränderungen durch unterschiedliche Grenzwellenlängen

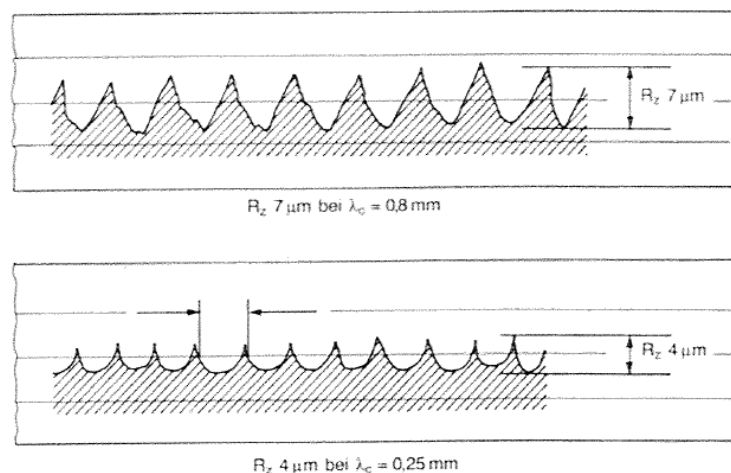


Abbildung 42: Verfälschung der Rauheit durch zu klein gewählten Wellenfilter

3.4 Übersicht über die Kenngrößen

Eine große Anzahl von Kennwerten ist genormt. Die Problematik für den Konstrukteur besteht darin aussagefähige Kennwerte für die geforderte Funktion zu bestimmen. Die angefügte Auflistung dient nur als Übersicht und beinhaltet nicht alle berechenbaren Kennwerte von modernen Oberflächenmessgeräten.

Arithmetischer Mittenrauwert R_a	DIN EN ISO 4287:1998
Quadratischer Mittenrauwert R_q	DIN EN ISO 4287:1998
Rautiefe R_z	DIN EN ISO 4287:1998
Maximale Einzelrautiefe R_{max}	DIN EN ISO 4287:1998
Rautiefe R_t	DIN EN ISO 4287:1998
Mittlere Glättungstiefe R_p	DIN EN ISO 4287:1998
Mittlere Riefentiefe R_v	DIN EN ISO 4287:1998
Mittlere Rillenbreite R_{sm}	DIN EN ISO 4287:1998
Abbott-Kurve	DIN EN ISO 4287:1998
Materialanteil R_{mr}	DIN EN ISO 4287:1998
Kernrautiefe R_k	DIN EN ISO 13565:1998
Materialanteil 1 M_{r1}	DIN EN ISO 13565:1998
Materialanteil 2 M_{r2}	DIN EN ISO 13565:1998
Reduzierte Spitzenhöhe R_{pk}	DIN EN ISO 13565:1998
Reduzierte Riefentiefe R_{vk}	DIN EN ISO 13565:1998
Wellentiefe W_t	DIN EN ISO 4287:1998
Profiltiefe P_t	DIN EN ISO 4287:1998

Tabelle 4: Oberflächenkennwerte Übersicht mit Norm

3.3.7 Wesentliche Rauheitskenngrößen

Die Vielzahl der Rauheitskenngrößen wird im Einzelnen nicht erläutert und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Wesentliche Kenngrößen werden nun genauer untersucht, welche im Praxisteil ausgewertet werden. Die Auswahl der Kenngrößen stützt sich auf die üblichen Zeichnungsangaben.

Im folgenden Abschnitt wird genauer auf die wesentlichen Rauheitskennwerte eingegangen.

a) Maximale Rautiefe R_{\max}

R_{\max} wird aus dem R-Profil bestimmt, das wie im Abschnitt Elektrischer Profilfilter beschrieben hochpassgefiltert und in 5 Einzelmessstrecken von der Länge λ_c oder l_r aufgeteilt wird. Innerhalb jeder dieser Einzelmessstrecken wird die Differenz R_{zi} , $1 \leq i \leq 5$, zwischen dem kleinsten und dem größten Messwert bestimmt. Das Maximum der Werte R_{z1} bis R_{z5} ist die maximale Rautiefe R_{\max} . (DIN EN ISO 4287 1998)

$$R_{\max} = \max\{R_{z1}, \dots, R_{z5}\}$$

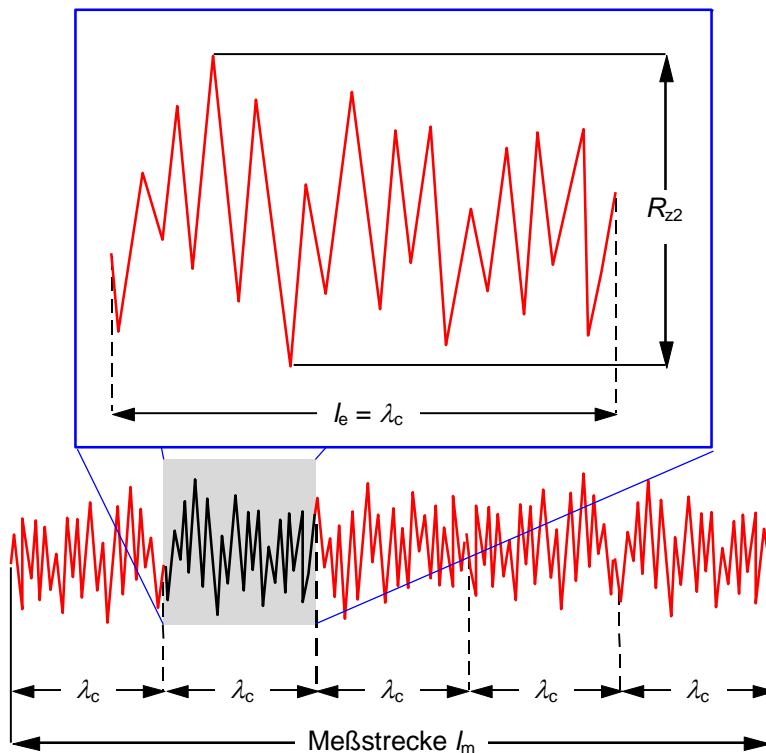


Abbildung 43: Bestimmen der maximalen Rautiefe R_{\max}

Die Wiederholbarkeit der Messung hängt auch bei der maximalen Rautiefe R_{\max} stark von einzelnen Ausreißern im Profil ab. R_{\max} kann daher nur dann angewendet werden, wenn isolierte Spitzen und Täler funktionsbestimmend sind. R_{\max} wird nahezu ausschließlich dazu eingesetzt, um statische und dynamische Dichtflächen zu beurteilen (bei letzteren vor allen Dingen das Einlaufverhalten). (Mahr GmbH 2002, 4-7)

b) Mittlere Rautiefe Rz

Wie R_{\max} wird auch die mittlere Rautiefe R_z aus dem R-Profil bzw. aus den daraus bestimmten Einzelwerte R_{z1} bis R_{z5} berechnet, allerdings nicht als Maximal-, sondern als Mittelwert.

(DIN EN ISO 4287 1998)

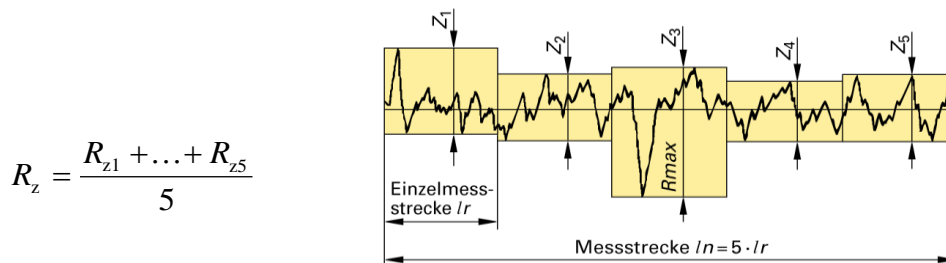


Abbildung 44: Übersicht Rauheitskennwerte Rmax, Rz

Dadurch reduziert sich der Einfluss echter Ausreißer im Profil im Vergleich zur maximalen Rautiefe R_{\max} um 80 auf nur noch 20 Prozent. Die unmittelbare Folge ist eine deutlich verbesserte Wiederholbarkeit der Messergebnisse.

Zumindest im europäischen Wirtschaftsraum ist die mittlere Rautiefe R_z neben dem weiter unten beschriebenen arithmetischen Mittenrauwert R_a die am häufigsten in technischen Zeichnungen eingetragene Oberflächenkenngröße. Wie bei R_a ist auch die Anwendbarkeit von R_z auf keine speziellen Oberflächen beschränkt. In der Regel ist die mittlere Rautiefe R_z sogar deutlich besser geeignet als R_a , die Funktionseigenschaften von Oberflächen zu beurteilen, da R_z viel sensibler auf isolierte Fehlstellen im Profil reagiert.

R_z wird z.B.: für belastete Funktionsflächen, Dichtflächen, Führungsflächen usw. eingesetzt

Bei gefrästen Dichtflächen, strukturierten Plastikoberflächen und bei (Blick-) Flächen, die lackiert werden sollen, kann es Sinn machen, für R_z auch Mindestwerte vorzugeben. (Mahr GmbH 2002, 4-8)

c) Grundrautiefe R3z

Wie bei der mittleren Rautiefe wird auch die Grundrautiefe R_{3z} als Mittelwert aus 5 Einzelwerten R_{3z1} bis R_{3z5} berechnet. Dabei ist der i-te Wert R_{3zi} die Höhendifferenz zwischen der dritthöchsten Spitze und dem dritt tiefsten Tal innerhalb der i-ten Einzelmessstrecke, $i=1, \dots, 5$. (DIN EN ISO 4287 1998)

$$R_{3z} = \frac{R_{3z1} + \dots + R_{3z5}}{5}$$

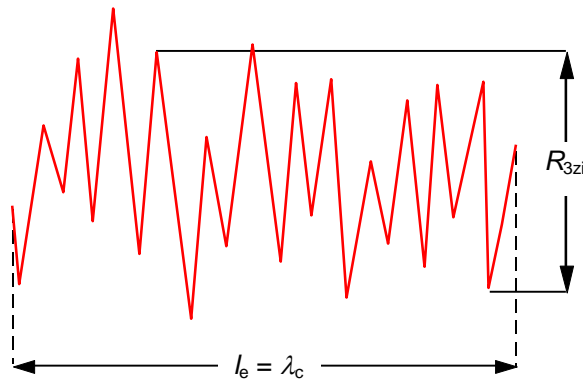


Abbildung 45: Bestimmen der Einzel - Grundrautiefe R3z

Bestimmen der Grundrautiefe R_{3z} aus den Einzelwerten R_{3z1} bis R_{3z5}

Weder in den nationalen noch in den internationalen Normblättern enthalten, erhält die Grundrautiefe R_{3z} eine gewisse Bedeutung dadurch, dass sie von der Firma Daimler Benz schon 1983 durch die Werknorm DB N 31007 eingeführt wurde. Sie zeichnet sich gegenüber der mittlere Rautiefe R_z nach DIN durch eine weiter verringerte Ausreißer-Empfindlichkeit aus und ist daher z. B. gut geeignet, um das Funktionsverhalten von hydrodynamischen Gleitflächen zu beurteilen. (Mahr GmbH 2002, 4-11)

d) Glättungstiefe R_p

Anders als die zuvor beschriebenen Rauheitskenngrößen ist die Glättungstiefe R_p kein Maß für die vertikale Zerklüftung der Oberfläche insgesamt, sondern nur für die über die Mittellinie hinausragenden Spitzen im Profil. (DIN EN ISO 4287 1998)

$$R_p = \frac{R_{p1} + \dots + R_{p5}}{5}$$

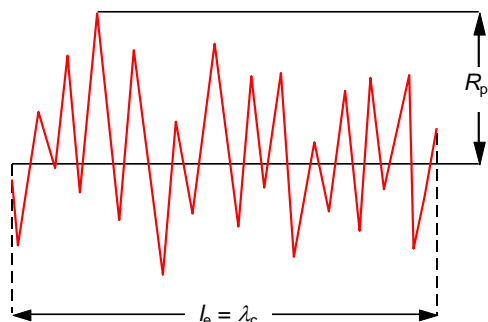


Abbildung 46: Bestimmen der Einzel-Glättungstiefen R_{pi} , $i=1, \dots, 5$

Das zahlenmäßige Verhältnis von R_p zu R_z gibt Auskunft über die Symmetrie des Profils: Bei einem rundkämmigen Profil liegt die Ausgleichsgerade höher im Profil, d. h. der Quotient R_p/R_z

ist kleiner als bei einem spitzkämmigen Profil. Das Verhältnis R_p/R_z erscheint also prinzipiell geeignet, die Form des R-Profiles zu beurteilen. Daher sind praktische Anwendungen speziell zur Prognose des Verschleißverhaltens von hochbelasteten Funktionsflächen an Motorenbauteilen versucht worden; die Glättungstiefe R_p selbst wurde oder wird außerdem u. a. noch zur Prüfung von Führungen, porösen Oberflächen an gesinterten und Keramik-Bauteilen und von Papier-Oberflächen verwendet. (Mahr GmbH 2002, 4-14)

Analog zu R_p wird in DIN EN ISO 4287 als neue Tiefenkenngroße auch die Tiefe des größten Profiltals R_v festgelegt.

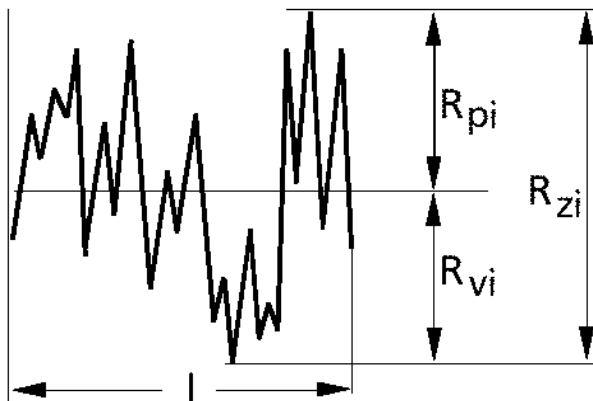


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen R_p , R_v und R_z

e) Arithmetischer Mittenrauwert R_a (AA, CLA)

Im internationalen Vergleich ist der arithmetische Mittenrauwert R_a , der in den angelsächsischen Ländern auch als AA (Arithmetical Average) oder CLA (Center Line Average height) bezeichnet wird, die wohl gebräuchlichste Oberflächenkenngroße. Ein Grund hierfür sind die einfachen und preisgünstigen Messgeräte, ein anderer die gute Wiederholbarkeit bei Wiederholmessungen.

Bezugsstrecke für R_a ist die gesamte Messstrecke l_m , nicht die Einzelmessstrecke l_e :

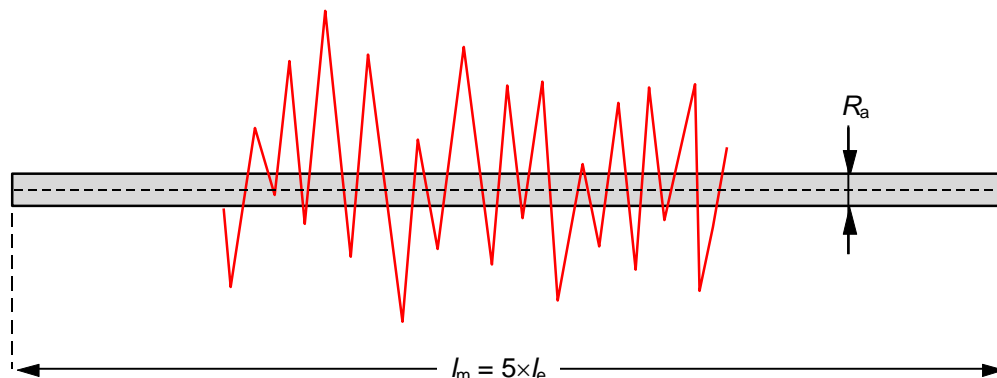


Abbildung 48: Bestimmen des arithmetischen Mittenrauwerts R_a

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|$$

In der neuen Kenngrößen-Norm DIN EN ISO 4287 wird der arithmetische Mittenrauwert R_a als arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten bezeichnet.

Diese Festlegung ist nicht besonders anschaulich und aus dem Profildigramm ohne die Hilfe eines Messrechners nicht nachzuvollziehen. R_a hängt auch so gut wie gar nicht von einzelnen Profilmerkmalen ab und macht nur eine Aussage darüber, ob und wie viel Rauheit durchschnittlich - über das ganze Profil verteilt - vorhanden ist.

Daher ist die Aussagekraft des arithmetischen Mittenrauwerths deutlich geringer als die Aussagekraft der zuvor beschriebenen Rauheitskenngrößen.

Auch wenn Zeichnungen oft nur diese Rauheitskenngröße enthalten, sind kaum Anwendungsfälle bekannt, in dem die Prüfung von R_a alleine ausreicht, um die Funktion der auf Rauheit tolerierten Werkstückflächen zuverlässig sicherzustellen. (Neben R_a sollte auf jeden Fall mindestens noch R_z geprüft werden.) (Mahr GmbH 2002, 4-13)

f) Profiltiefe P_t

Von allen Kenngrößen-Definitionen am einfachsten zu verstehen ist die Festlegung der Profiltiefe P_t . Sie wird bestimmt als der vertikale Abstand von unterer und oberer Begrenzungslinie des ausgerichteten, ungefilterten P-Profils über die Bezugsstrecke l .

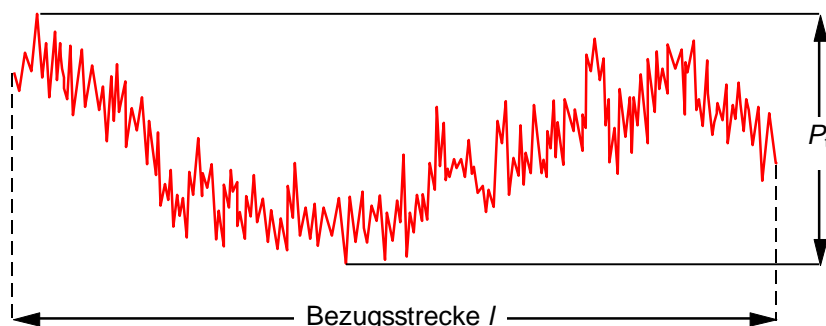


Abbildung 49: Bestimmen der Profiltiefe P_t

Die Länge l der Bezugsstrecke muss in der Zeichnung vorgegeben sein, oft kommen die 5 Einzelmessstrecken l_e inkl. Vorlauf- und Nachlaufstrecke zum Einsatz. Wird die Bezugsstrecke kürzer gewählt, so wird auch P_t kleiner.

Einzelne Ausreißer im Profil vergrößern demgegenüber die Profiltiefe.

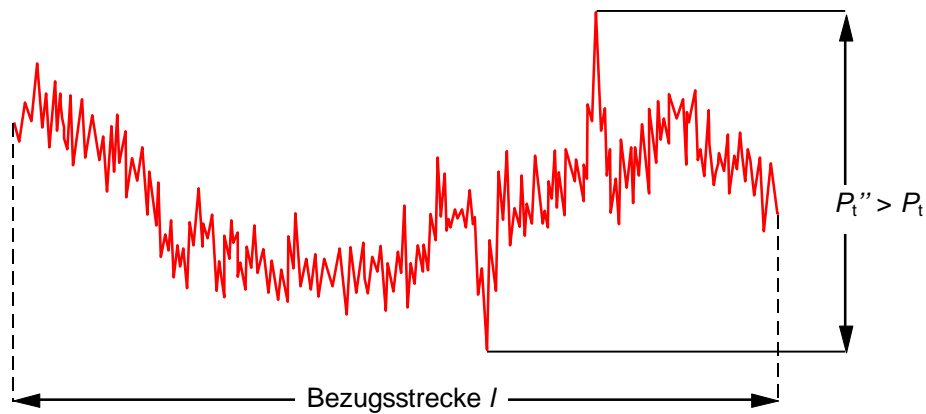


Abbildung 50: Der Einfluss einzelner Profilsitzen auf P_t

Die Kenngröße P_t ist ein Maß aller Gestaltabweichungen einer Prüffläche, Form, Welligkeit und Rauheit eingeschlossen.

P_t wird z.B. bei Dichtflächen, elektrische Kontaktflächen oder Blickflächen eingesetzt.

Es kann auch sinnvoll sein, die Profiltiefe P_t als Maß für die Rauheit der Werkstückoberfläche in die Zeichnung einzutragen, wenn die Prüffläche zu klein ist, um darauf eine der Filter-Norm entsprechende Taststrecke unterzubringen. In Fällen also, wo eine Tolerierung mit Kenngrößen, die aus dem R- oder W-Profil abgeleitet sind, nicht möglich ist.

g) Die Materialanteilkurve

Das Verfahren zur Auswertung einer Materialanteilkurve oder Abbott-Firestone Kurve beruht auf einer bestimmten Schnittlinie im Profil. Ausgedrückt wird das Verhältnis der materialerfüllten Länge zur Gesamtmessstrecke. Beginn der Schnittlinien an den höchsten Profilsitzen mit $M_t=0\%$. Tiefste Schnittlinie nach dem tiefsten Profiltal $M_t=100\%$. Zu jeder Schnittlinie kann aus der Materialanteilkurve der zugehörige Materialanteil abgelesen werden. (Flores, Gerhard 2010, 12)

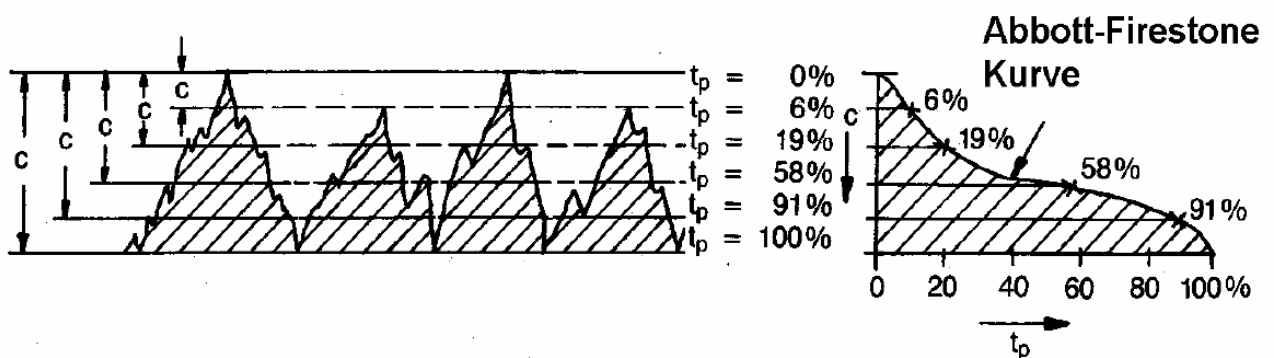


Abbildung 51: Konstruktion der Abbott-Firestone Kurve

Die Kenngrößen zur Beschreibung des Materialanteils werden aus der Materialanteilkurve bestimmt. Damit das im Folgenden beschriebene Verfahren zum Ergebnis führt, ist es zwingend erforderlich, dass die aus dem nach Teil 1 der Norm DIN EN ISO 13565 gefilterten Profil berechnete Materialanteilkurve einen S-förmigen Verlauf hat. Sie muss zunächst steil abfallen, dann aber einen flacheren Verlauf haben, der wieder in einem steiler abfallenden Kurvenstück endet.

Hat die Materialanteilkurve den geforderten S-förmigen Verlauf, so wird zunächst die am wenigsten geneigte 40%-Sehne der Kurve gesucht.

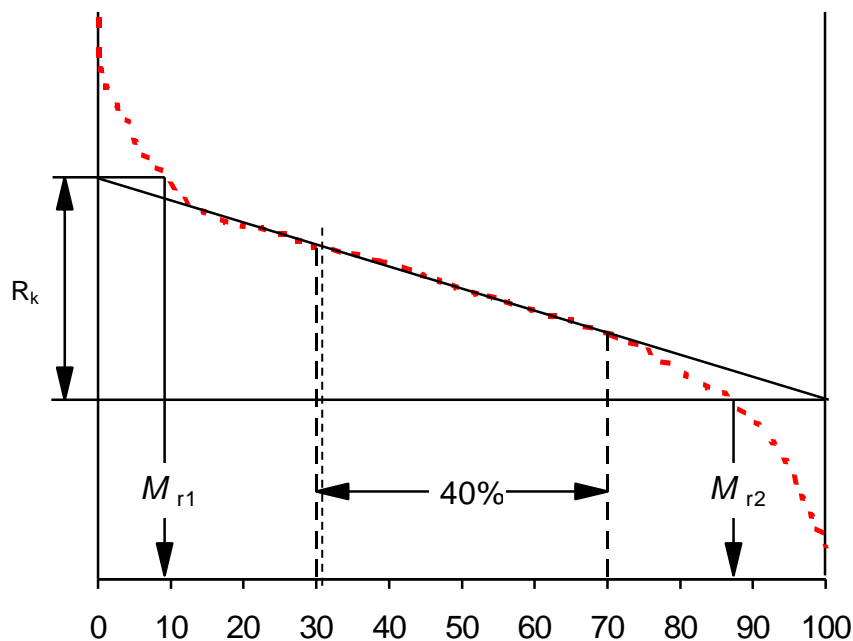


Abbildung 52: Auswertung der Materialanteilkurve nach DIN EN ISO 13565-2

Der vertikale Abstand der Schnittpunkte dieser Sehne mit den 0%- und 100%-Achsen ist die Kernrautiefe R_K , die den beiden Schnitthöhen zugeordneten Materialanteile sind die Kenngrößen M_{r1} und M_{r2} nach DIN EN ISO 13565-2. Die durch die Materialanteilkurve begrenzten Flächen, die über und unter diesen Schnittpunkten liegen, werden den Profilspitzen bzw. den Profiltälern zugeordnet.

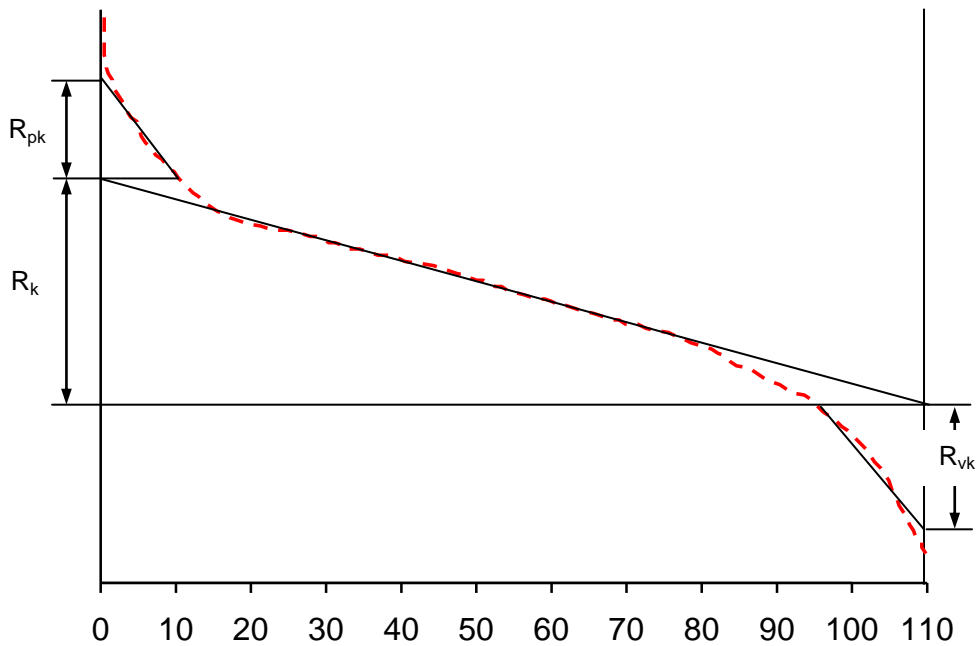


Abbildung 53: Bestimmen der Kenngrößen R_{PK} und R_{VK} nach DIN EN ISO 13565-2

Die reduzierte Spitzenhöhe R_{PK} ist die Höhe desjenigen Dreiecks, das die gleiche Grundlinie und denselben Flächeninhalt wie die Fläche hat, die den Profilsitzen zugeordnet ist (siehe Abbildung). Analog dazu ist die reduzierte Riefentiefe R_{VK} die Höhe desjenigen Dreiecks, das die gleiche Grundlinie und denselben Flächeninhalt wie die Fläche hat, die den Profiltälern zugeordnet ist. (DIN EN ISO 4287 1998)

3.5 Erreichbare Rauheit von Oberflächen

Nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über verschiedene Fertigungsverfahren und die erreichbaren Oberflächenqualitäten.

Beim Fräsen wird ein üblicher Rz Wert von 10-63µm und ein erreichbarer von 1,6µm angegeben. Der Ra Wert liegt üblich bei 1,6 bis 12,5µm erreichbar ist 0,4µm. (Tabellenbuch 2006, 101)

Erreichbare Rauheit von Oberflächen ¹⁾							
Fertigungsverfahren		Rz in µm bei Fertigungsverfahren			Ra in µm bei Fertigungsverfahren		
		genau min.	üblich von... bis	grob max.	genau min.	üblich von... bis	grob max.
Umformen	Gießen: Druckguss	4	10...100	160	–	0,8...30	–
	Kokillenguss	10	25...160	250	–	3,2...50	–
	Sandformguss	25	63...250	1000	–	12,5...50	–
	Sintern: Sinterglatt	–	2,5...10	–	–	0,4...1,6	–
	Kalibrierglatt	–	1,6...7	–	–	0,3...0,8	–
Umformen	Fließpressen	4	25...100	400	0,8	3,2...12,5	25
	Gesenkformen	10	63...400	1000	0,8	2,5...12,5	25
	Strangpressen	4	25...100	400	0,8	3,2...12,5	25
	Tiefziehen von Blechen	0,4	4...10	16	0,2	1...3,2	6,3
	Walzen: Glattwalzen	0,1	0,5...6,3	10	0,025	0,06...1,6	2
Trennen	Abtragen: Drahterodieren	0,8	2,8...10	16	0,1	0,4...1	3,2
	Senkerodieren	1,5	5...10	31	0,2	0,45	6,3
	Zerteilen: Autogenes Brennschneiden	16	40...100	1000	3,2	8...16	50
	Laserstrahlschneiden	–	10...100	–	–	1...10	–
	Plasmaschneiden	–	6...280	–	–	1...10	–
	Scherschneiden	–	10...63	–	–	1,6...12,5	–
	Wasserstrahlschneiden	4	16...100	400	1,6	6,3...25	50
	Spanen: Bohren: ins Volle bohren	16	40...160	250	1,6	6,3...12,5	25
	Aufbohren	0,1	2,5...25	40	0,05	0,4...3,2	12,5
	Senken	6,3	10...25	40	0,8	1,6...6,3	12,5
	Reiben	0,4	4...10	25	0,2	0,8...2	6,3
	Drehen: Längsdrehen	1	4...63	250	0,2	0,8...12,5	50
	Plandrehen	2,5	10...63	250	0,4	1,6...12,5	50
	Fräsen: Umfangs-, Stirnfräsen	1,6	10...63	160	0,4	1,6...12,5	25
	Honen: Kurzhubhonen	0,04	0,1...1	2,5	0,006	0,02...0,17	0,34
	Langhubhonen	0,04	1...11	15	0,006	0,13...0,65	1,6
	Läppen	0,04	0,25...1,6	10	0,006	0,025...0,2	0,21
	Polierläppen	–	0,04...0,25	0,4	–	0,005...0,035	0,05
	Schleifen	0,1	1,6...4	25	0,012	0,2...0,8	6,3

¹⁾ Rauheitswerte, sofern sie nicht in DIN 4766-1 (zurückgezogen) enthalten sind, nach Angaben der Industrie.

Ablese-Beispiel:
 Reiben (für Oberflächenkenngröße Rz)
 genaue Fertigung $Rz = 4$ übliche Fertigung $Rz = 10$ grobe Fertigung $Rz = 25$
 $Rz_{\min} = 0,4$ $Rz_{\max} = 25$

Abbildung 54: Erreichbare Rauheit von Oberflächen

3.6 Zusammenhang von verschiedenen Oberflächenkennwerten

Nach vorliegenden Erfahrungen bestehen nicht einmal näherungsweise ein funktioneller Zusammenhang zwischen Oberflächenkennwerten, aus diesem Grund kann ein Zusammenhang nur mit einem Streubereich dargestellt werden. (Osanna 1992, S. 76)

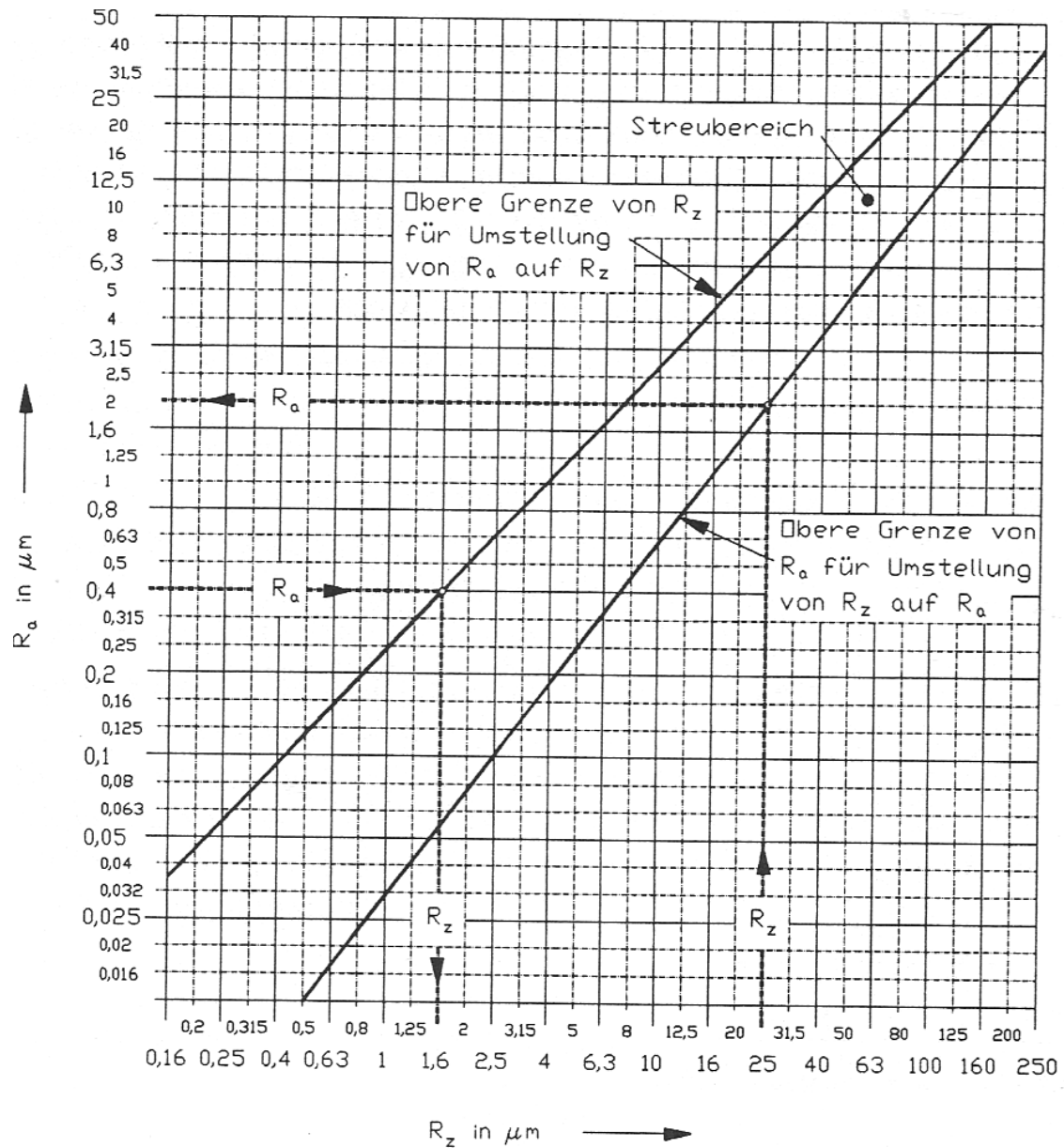


Abbildung 55: Korrelation R_z und R_a

4. Eingesetztes Fräswerkzeug

Der Fräser hat einen Durchmesser von 80mm und besitzt 6 Schneiden (Zähne). Die Schneiden werden in Kassetten gespannt, welche einzeln in Fräserachsrichtung positioniert werden können.

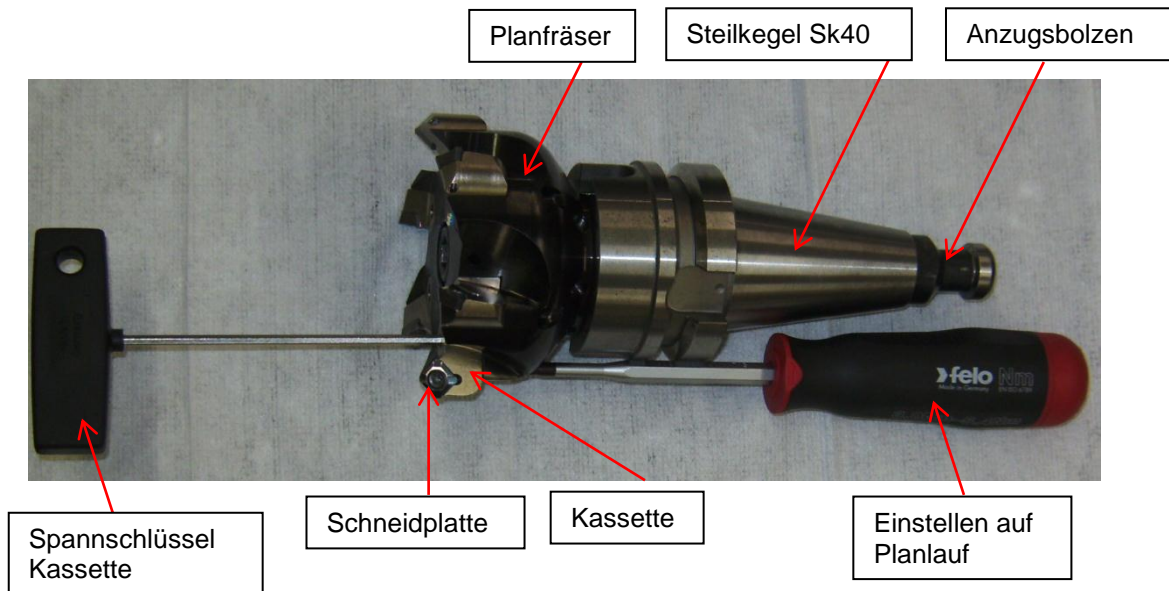


Abbildung 56: Fräswerkzeug mit Steilkegel

Das Fräswerkzeug ist eine neue Entwicklung der Fa. Tirottool und der Fa. Kofler. Es ermöglicht die Feineinstellung jeder einzelnen Kassetten in einem Planlaufbereich von 0,001mm. Als Planlauf wird das unterschiedliche Längsmaß der Zähne in Achsrichtung bezeichnet. Die Werkzeugaufnahme ist ein üblicher Steilkegel 40.

4.1 Verwendeter Schneidstoff

Als Schneidstoff kommt eine neuartige Diamantschneide CVD-D zum Einsatz. (Chemical-Vapour- Deposition von Diamant)

Im Vakuum bei Temperaturen um 1200°C bilden Wasserstoff und Methangas unter dem Lichtbogen ein Plasma. Diesem wird der Kohlenstoff entzogen und auf dem Substrat in Diamant abgeschieden. An der Oberfläche des Träger Substrats wachsen die Diamantkristalle zu einer gleichmäßigen polykristallinen Schicht mit zufälliger Kristall-Orientierung. Die Zuschnitte zur Bestückung der Werkzeugschneiden werden nach Ablösung der Schicht mit Laser gefertigt. (Krösbacher 2010, S. 10)

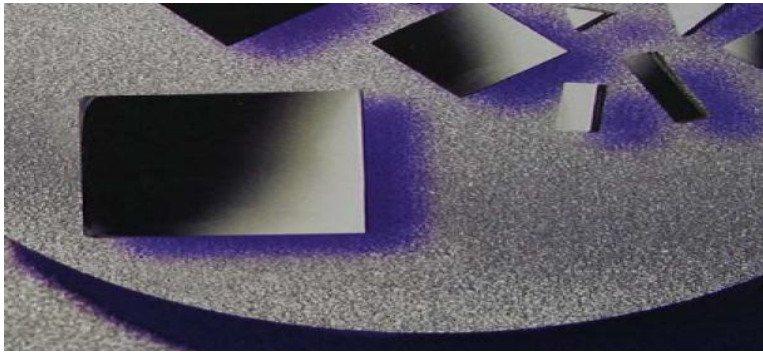


Abbildung 57 CVD Runde roh und poliert

Dieses polykristalline Diamantsubstrat, welches in Stärken von 0,5 bis 1,0 mm abgeschieden wird, beinhaltet keine metallische Bindungsphase.

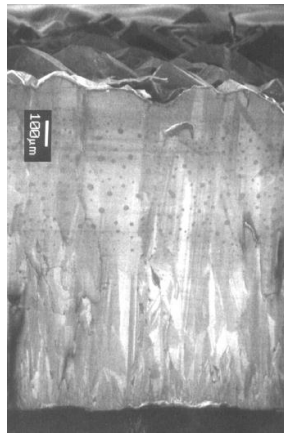


Abbildung 58 Querschliff CVD-D Dickschicht

Neuerdings werden in Verbindung mit diesem Schneidstoff feinstgelaserten Schneidkanten eingesetzt. Dies führt zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung der Schneide (keine Schartigkeit), was wiederum zu einer Erhöhung der Standmengen führt.

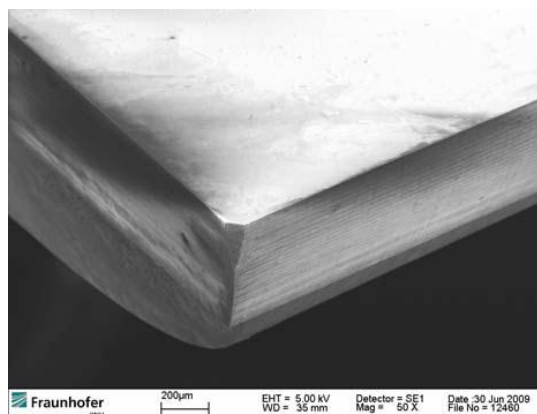


Abbildung 59 Feinstgelaserte Schneidkante

Aufgrund des Schneidstoffes und der Bearbeitung von Reinaluminium sind keine Einflüsse bzgl. Verschleiß auf die Oberfläche zu erwarten.

4.1.1 Ausführung der Schneidkante

a) Radiusplatte

Bei den Fräspalten 1., 2., 003, 004, 531, 532 kommt eine Radiusplatte zum Einsatz. Am Radius wird die Schneide axial auf 0,001mm eingestellt.

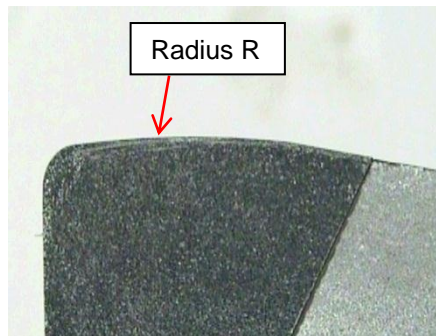


Abbildung 60: Radiusplatte

An der Schneidplatte konnten folgende Radien nachgemessen werden.

Z1	R13,01mm
Z2	R12,5mm
Z3	R12,14mm
Z4	R12,55mm
Z5	R12,905mm
Z6	R12,5mm

Tabelle 5: Messwerte Schneidkantenradius

Als Messmittel wurde ein Werkstattmikroskop mit Bildverarbeitung verwendet.

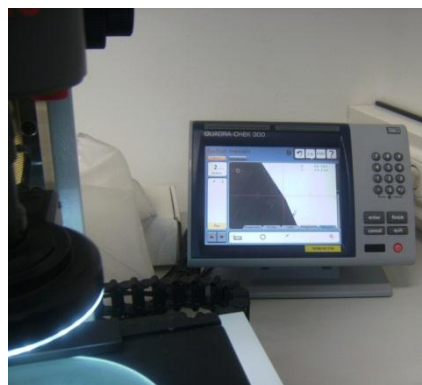


Abbildung 61: Werkstattmikroskop

b) Breitschlichtplatte

Bei den Proben 4.. wird auf einer Kassette anstelle der Radiusplatte eine Breitschlichtplatte eingesetzt. Diese Platte sollte eine annähernd ebene Fläche erzeugen mit einem Radius von 100mm. Dieser große Radius konnte mit dem Werkstattmikroskop nicht mehr nachgewiesen werden.

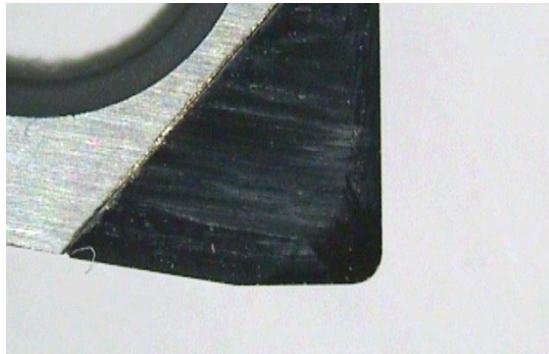


Abbildung 62: Breitschlichtplatte

Als Besonderheit wird hier eine Einstellung gewählt, wo die Breitschlichtplatte 0,05mm axial den Radiusplatten vorgestellt. Diese Einstellung sollte garantieren, dass nur die „unterste“ Platte, in dem Fall die Breitschlichtplatte die Oberfläche erzeugt (vgl. 2.4.1).

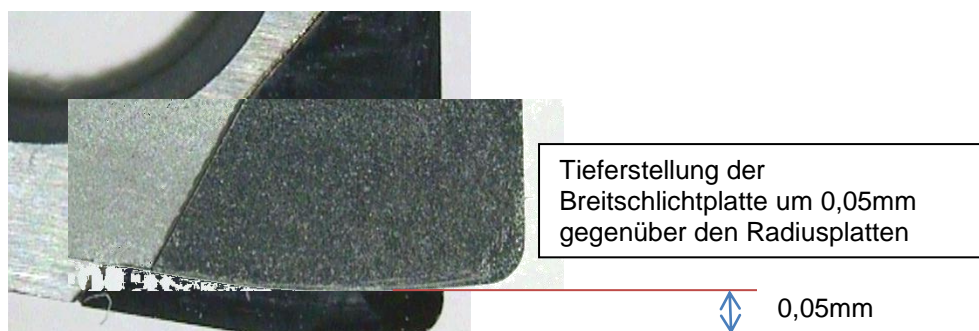


Abbildung 63: Korrektur der Breitschlichtplatte

4.2 Einstellvorgang

Mithilfe der Befestigungsschraube werden alle Kassetten auf die Anlage im Messerkopf gezogen (4 Nm). Am Voreinstellgerät werden mit der Stellschraube alle Schneiden auf Planlauf 0,001mm gebracht. Anschließend werden die Befestigungsschrauben mit einem Drehmoment von 8Nm nachgezogen.

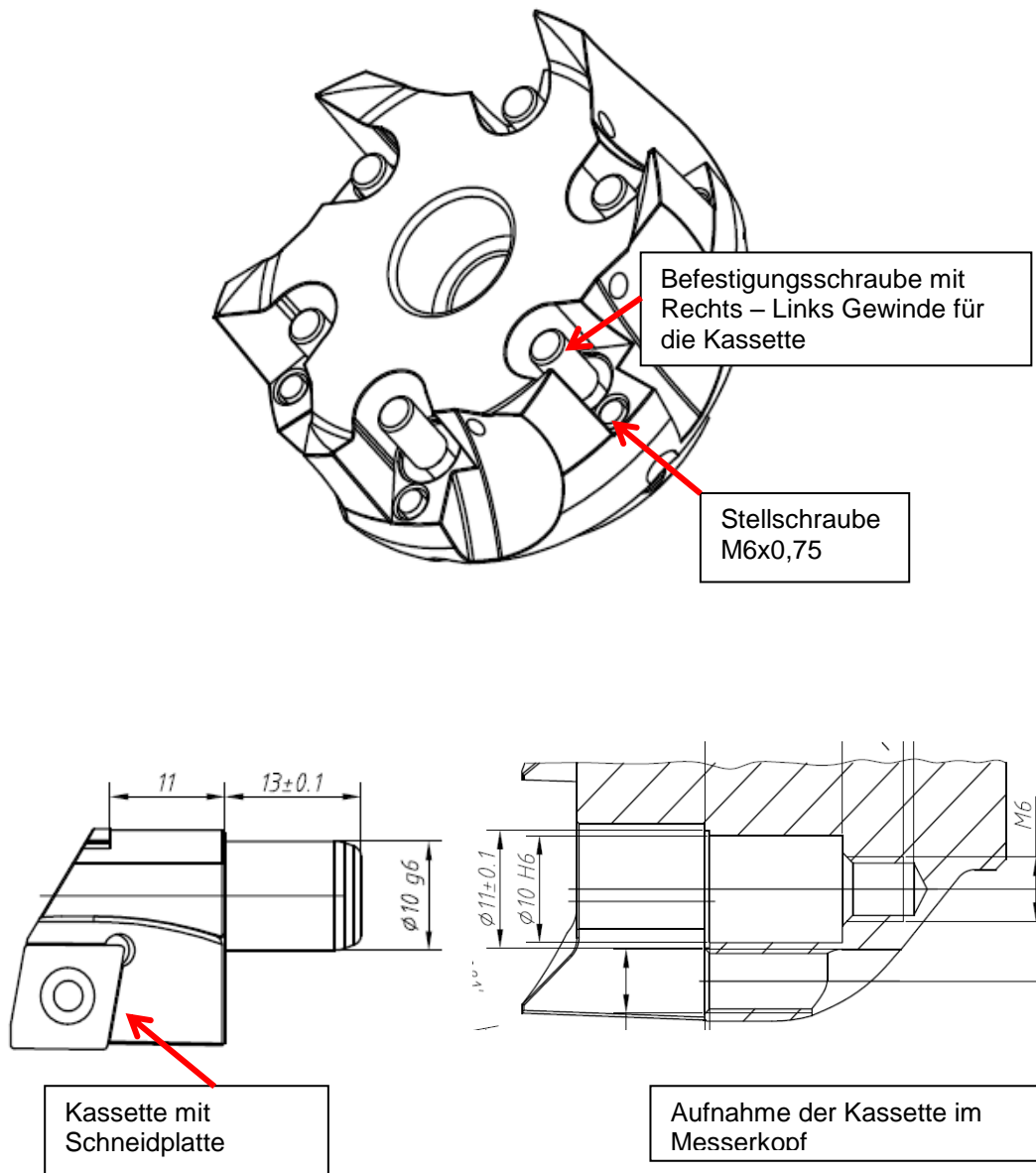


Abbildung 64: Kassette mit Messerkopf, Feineinstellung

4.3 Werkzeugvoreinstellung

Die Werkzeugvermessung wurde mit einem Werkzeugvoreinstellgerät der Fa. Zoller V4001 durchgeführt. Es wurde eine Rundlaufgenauigkeit von 0,003mm bei einer Prüfdornlänge von 300mm erreicht. (Kalibrierschein vom 09.03.2010)

Die Fa. Zoller garantiert eine Positioniergenauigkeit von $\pm 0,001\text{mm}$ und eine Planlaufgenauigkeit von 0,001mm. (Fa. Zoller Rev. 2006-09-14/03/Sr, 2010)

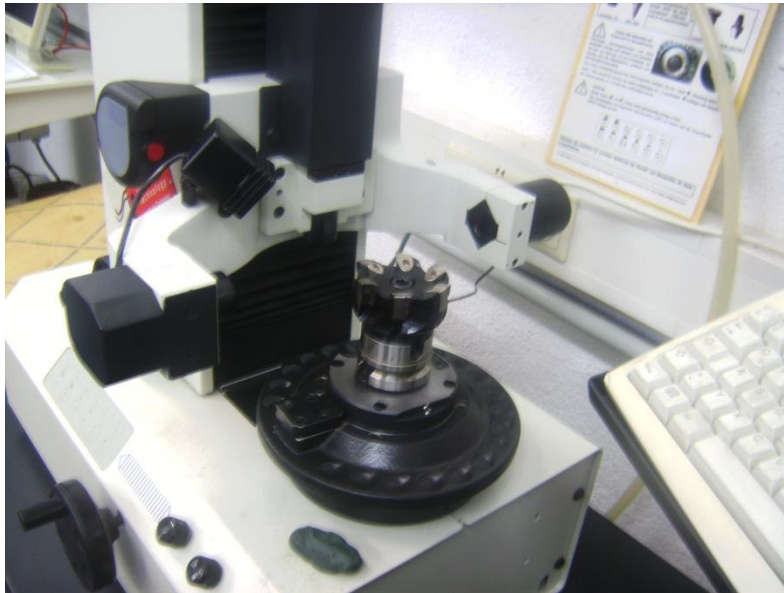


Abbildung 65 Zoller V4001

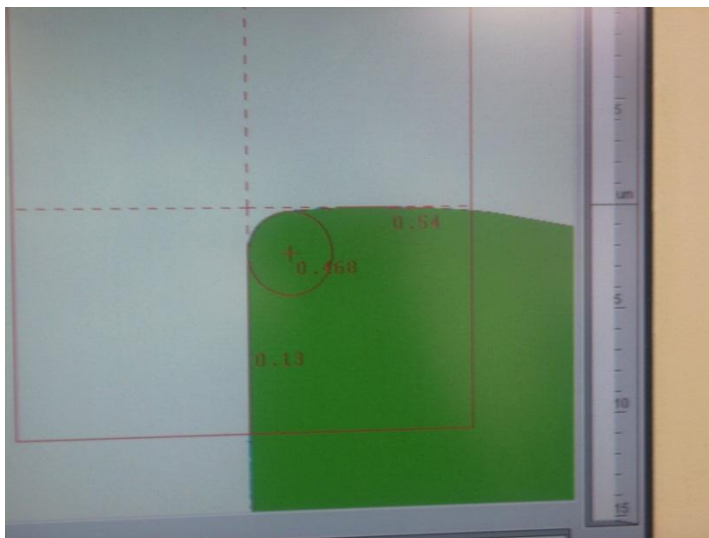


Abbildung 66 Vermessung der Breitschichtplatte

4.4 Werkzeugwuchten

Mit dem Gerät der Fa. Haimer wurde das Werkzeug mit Steilkegel und Schneidplatten gewuchtet.



Abbildung 67: Wuchtvorgang

Ungewuchtet (montiert vom Lager) ergab sich eine Wuchtgüte von 4. Dies entspricht einer Unwucht von 7,4gmm. Die Werkzeugmasse beträgt 2,52kg. Mit dieser Qualität wurden die Proben 531 und 532 gefräst.

Für alle anderen Versuche wurde das Werkzeug feingewuchtet auf eine Wuchtgüte von 6,3. Dies entspricht einer Unwucht von 1,7gmm.

5. Fräsversuch

Um die Funktion des Werkzeuges in Bezug auf das Oberflächenverhalten zu testen, wird ein möglichst einfacher Versuch durchgeführt. Dieser Versuch muss universell sein und soll auch bei anderen Werkzeugen einsetzbar sein.

Der Einfluss von Schnittkräften, Schwingungen, Verschleiß und Nachschnittverhalten soll so klein wie möglich gehalten werden um ein nachvollziehbares Ergebnis bei optimalen Bedingungen zu erreichen. Für die Bearbeitung wurde ein stabiles neuwertiges Bearbeitungszentrum gewählt.

5.1 Fräsprobe

Um die genannten Forderungen zu erfüllen werden folgende Merkmale festgelegt.

Material: Al 99,5% Werkstoffnummer AW-1050A

Zustelltiefe 0,5mm

Das Material wird als Reinaluminium bezeichnet und hat eine geringe Zugfestigkeit von ca. 80N/mm^2 , der Einfluss von Schnittkräften oder Verschleißeinflüssen ist daher sehr klein.

Die Schnitttiefe von 0,5mm ist bei Schlichtprozessen üblich und führt zu einer günstigen Zerspannung mit geringen Kräften.



Abbildung 68: Fräsprobe bei der Bearbeitung

Die einzelnen Vorschübe werden stufenförmig abgefräst. Die Stufen haben eine Länge von etwa 30mm und sind jeweils um 0,5mm in der Tiefe versetzt.

Die Messung erfolgt nach Norm mittig, normal auf die Bearbeitungsriefen. (vgl. 3.2)



Abbildung 69: Fräsprobe mit Stufen bei der Messung

5.2 Festgelegte Parameter auf den Fräsproben

Die Fräsproben wurden wie folgt bearbeitet:

Das Fräswerkzeug hat einen Durchmesser D von 80mm und eine Zähnezahl Z von 6.

Berechnung der Schnittgeschwindigkeit:

$$vc = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \quad (\text{Glng. 4})$$

Vc...	Schnittgeschwindigkeit	m/min
D...	Durchmesser	mm
n...	Drehzahl	U/min

Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit:

$$vf = n \times Z \times fz \quad (\text{Glng. 5})$$

Vf...	Vorschubgeschwindigkeit	(mm/min)
fz...	Vorschub/Zahn	(mm/Z)
z...	Zähnezahl	Z
n...	Drehzahl	U/min

Stufen:	Vorschub/Zahn	Vorschubgeschwindigkeit	Schnittgeschwindigkeit
	fz	mm/min	m/min
1	0,05	502	1508
2	0,075	754	1508
3	0,1	1005	1508
4	0,125	1256	1508
5	0,15	1507	1508
6	0,175	1758	1508
7	0,2	2010	1508

Tabelle 6: Fräsproben; Vorschubstufen und Vorschubgeschwindigkeiten

Die Proben wurden mit folgenden Einstellungen gefräst.

Probe Nr.:	Planlauf μm	Breitschlicht	Kühlmittel	fz	Wuchtgüte
11	1	nein	ohne KM	Stufen	1,7g/mm
21 bis 25	1	nein	KM	Stufen	1,7g/mm
41 bis 45	0,05mm vor	ja	KM	Stufen	1,7g/mm
003	3	nein	KM	Stufen	1,7g/mm
004	4	nein	KM	Stufen	1,7g/mm
531 u 532	3	nein	KM	Stufen	7,4g/mm

Tabelle 7: Fräsproben; Einsatzbedingungen

Die Probe 21008 wurde mit einem festen Vorschub pro Zahn gefräst.

Probe Nr.:	Planlauf μm	Breitschlicht	Kühlmittel	fz	Wuchtgüte
21008	1	nein	KM	0,075	1,7g/mm

Die Drehzahl wurde auf jeder Stufe geändert.

Stufen:	Vorschubgeschwindigkeit	Drehzahl	Schnittgeschwindigkeit
	m/min	U/min	m/min
1	900	2000	502
2	1350	3000	754
3	1800	4000	1005
4	2250	5000	1256
5	2700	6000	1508
6	3150	7000	1758
7	3600	8000	2010

Tabelle 8: Fräsprobe; 21008

6. Oberflächenmessgeräte

Die Oberflächenprüfungen wurden mit zwei verschiedenen Messsystemen durchgeführt.

6.1 Bezugsebenen-Tastgerät S2



Abbildung 70: Bezugsflächenmessung S2

Die Messung mit dem S2 ermöglicht eine unverfälschte Darstellung von Welligkeiten (vgl. 3.3.2). Das Messgerät muss zur Oberfläche ausgerichtet werden, das Vorschubgerät ist auf einem Messständer aufgebaut, die Messung kann nur im Messraum erfolgen.



Abbildung 71: Bezugsflächentaster

6.2 Kufen-Tastgerät M2

Beim Kufen-Tastgerät erfolgt beim Aufsetzen des Messgerätes eine automatische Ausrichtung durch die Gleitkufe, die Messung ist schwingungsunempfindlich und kann direkt an der Bearbeitungsmaschine durchgeführt werden.

(vgl. 3.2.3)



Abbildung 72: Kufen-Tastsystem

Es handelt sich um ein Einkufen-Tastsystem, die Kufe ist als sphärische Kufe mit einem Radius von 25mm ausgeführt. Der Kufenradius quer beträgt 2,9mm. Der Gleitpunkt der Kufe liegt 0,8mm vor dem Messpunkt der Tastspitze. (Prospekt S2 2006)

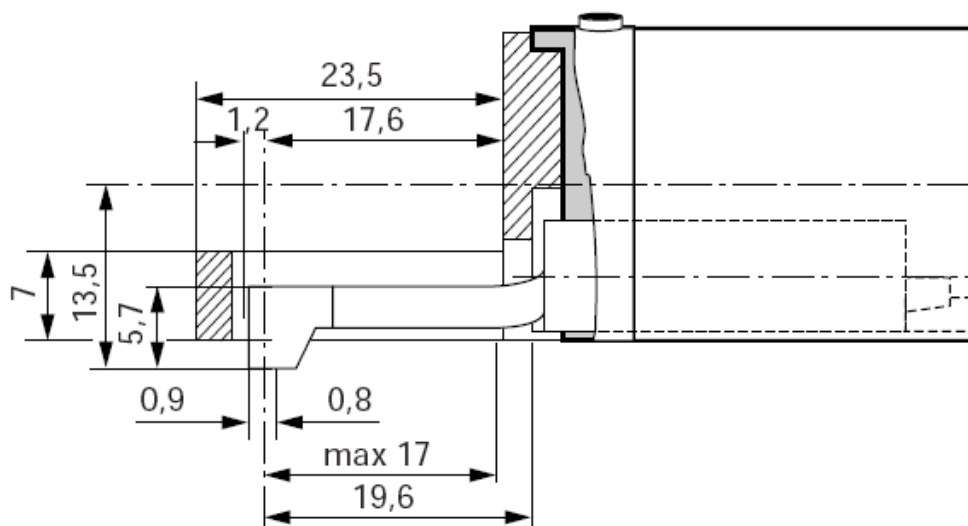


Abbildung 73: Kufentaster Geometrie

7. Oberflächenprüfung

7.1 Kennwerte Kufen-Tastsystem

Die Messwerte wurden aus den Rohdaten (siehe Anhang) entnommen und zur besseren Übersichtlichkeit in Diagrammform dargestellt.

Die X-Achse stellt den Vorschub pro Zahn dar, die Y-Achse die Abweichung in μm .

Alle Messungen ohne Kennzeichnung wurden mit der normgerechten Grenzwellenlänge von 0,8mm durchgeführt. (vgl. 3.3.6)

7.1.1 Vergleich Ra, Rz und Rmax

a) Fräsprobe 22

Feingewuchtet, Planlauf=0,001mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$, Plattenradius=13mm

Zusammenhang Ra, Rz, Rmax bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

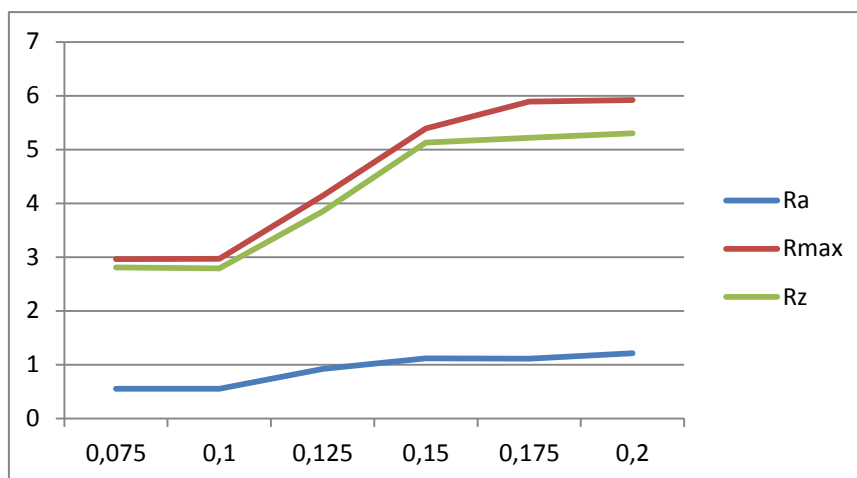


Diagramm 1: Probe22 Ra, Rz, Rmax

b) Fräspanne 42

Feingewuchtet, Breitschichtplatte R100mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$,
Zusammenhang R_a , R_z , R_{max} bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

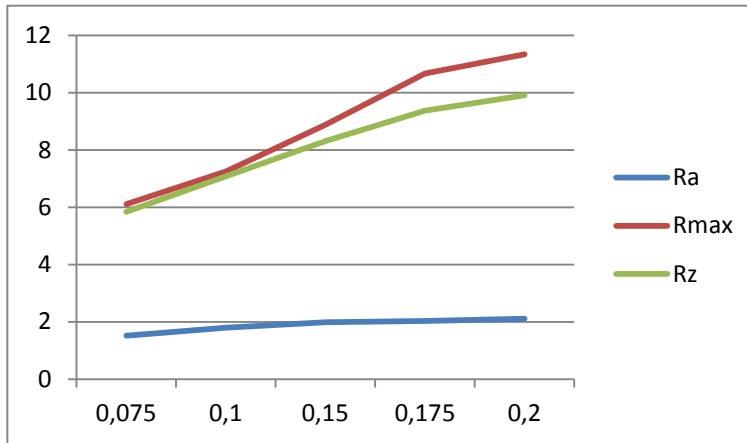


Diagramm 2: Probe 42 R_a , R_z , R_{max}

c) Fräspanne 003

Feingewuchtet, Planlauf=0,003mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$, Plattenradius=13mm
Zusammenhang R_a , R_z , R_{max} bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

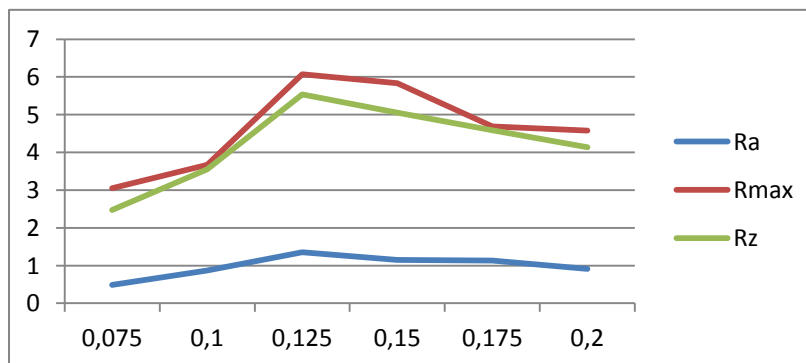


Diagramm 3: Probe003 R_a , R_z , R_{max}

d) Fräsprobe 531

Ungewuchtet, Planlauf=0,003mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$, Plattenradius=13mm

Zusammenhang Ra, Rz, Rmax bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

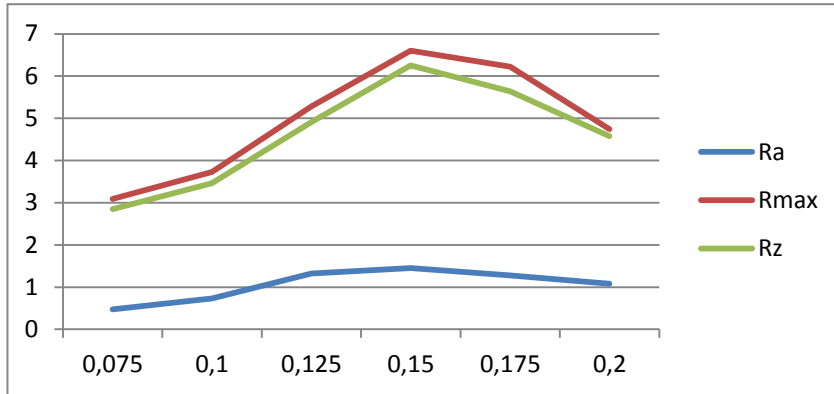


Diagramm 4: Probe 531 Ra, Rz, Rmax

e) Fräsprobe 11

Bearbeitung ohne Kühlmittel,

Feingewuchtet, Planlauf=0,001mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$, Plattenradius=13mm

Zusammenhang Ra, Rz, Rmax bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

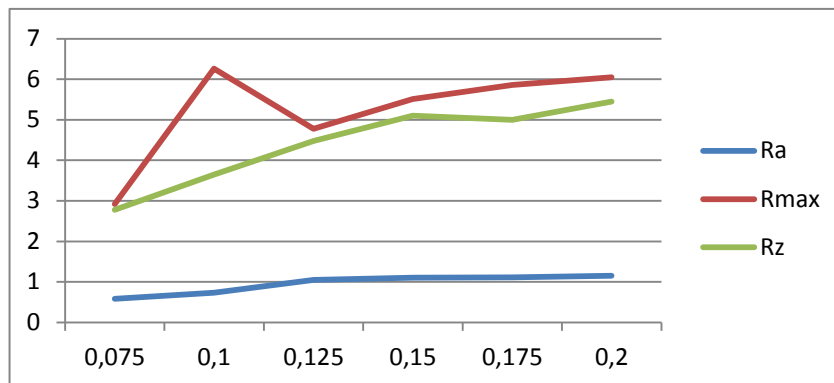


Diagramm 5: Probe 11 Ra, Rz, Rmax

f) Fräsprobe 004

Feingewuchtet, Planlauf=0,004mm, $v_c=1500\text{m/min}$, $n=6000\text{U/min}$, Plattenradius=13mm

Zusammenhang Ra, Rz, Rmax bei verschiedenen Vorschüben pro Zahn

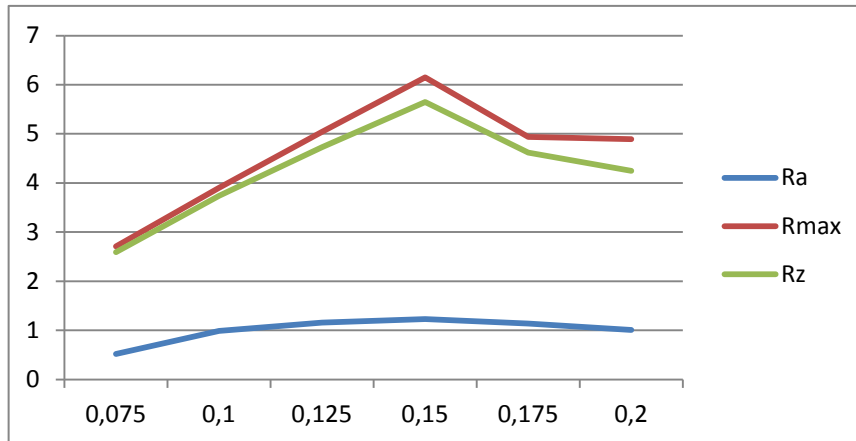


Diagramm 6: Probe004 Ra, Rz, Rmax

- Aufgrund der Auswertung kann in diesem Bereich kein Zusammenhang zwischen dem Vorschub pro Zahn und dem Ra Wert festgestellt werden. (vgl. 3.3.8)
- Alle Oberflächenkenngrößen sind bei der Probe 42 mit der Breitschlichtplatte wesentlich schlechter als bei den Proben mit der Radiusplatte. Die Rz Werte sind etwa doppelt so hoch wie bei der Probe 21.
- Bei der Probe 11 ohne Kühlmittel kommt es zu Ausreißen welche sich besonders im hohem Rmax Wert abzeichnen ($f_z=0,1\text{mm}$, Rmax über $6\mu\text{m}$). Dies ist durch einen unsauberen Spanablauf (teilweise Späneinschmelzung), welche optisch sichtbar sind zu erklären.
- Die Proben mit Planlauf 0,003 bzw. 0,004 zeigen verbesserte Werte bei größeren Vorschüben (ab $0,125\text{mm/Z}$ bzw. $0,15\text{mm/Z}$)

7.1.2 Vergleich der Rz Werte unterschiedlicher Proben

Aufgrund der geringen Aussage von R_a und der ebenfalls geringen Aussage von R_{max} welcher einen einzelnen Ausreißer feststellt (vgl. 3.3.7), wurde eine direkte Gegenüberstellung der R_z Werte vorgenommen.

a) Probe 22 - 42

Probe 22; Panlauf $1\mu\text{m}$, R_{13} - Probe 42; Breitschlichtplatte R_{100}

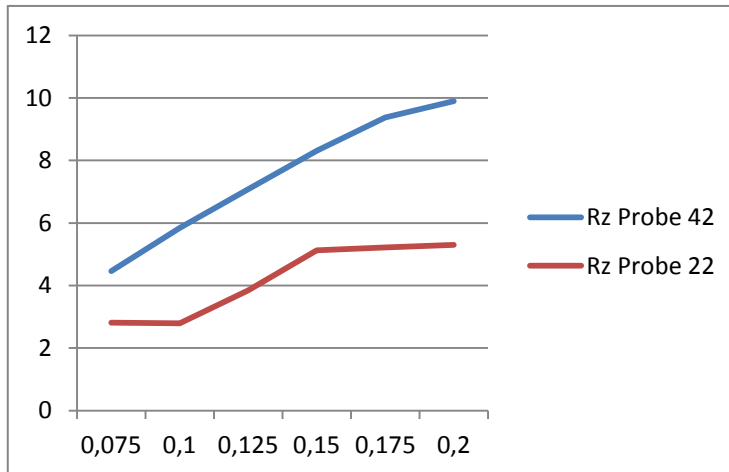


Diagramm 7: Vergleich Probe22 und 42

b) Probe 22 – 11 - 004

Proben 22; Planlauf $1\mu\text{m}$, R_{13} – Probe 11 (wie 22 aber ohne Kühlung) - Probe 004; Planlauf $0,004\text{mm}$

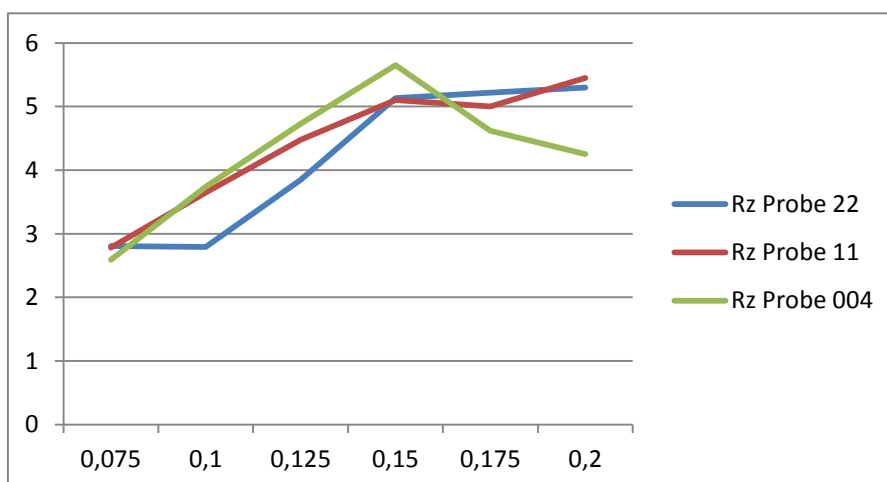


Diagramm 8: Vergleich Probe 22, 11, 004

c) Probe 003 - 531

Probe 003; Planlauf 0,003mm - Probe 531; Planlauf 0.003mm ungewuchtet

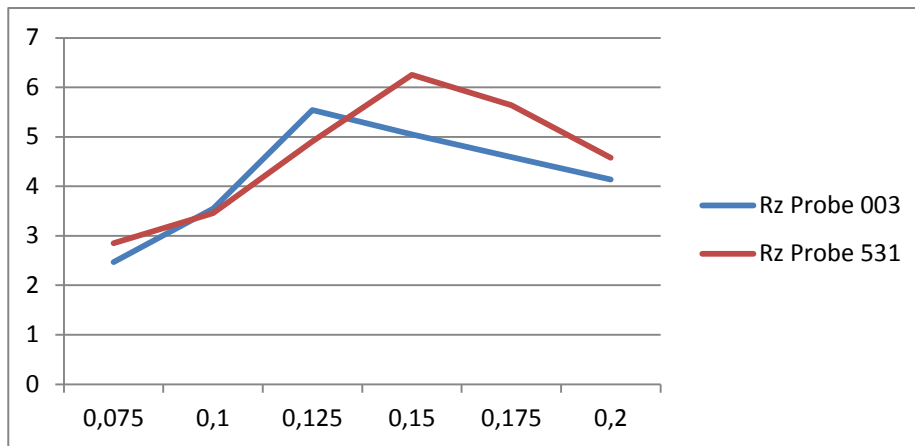


Diagramm 9: Vergleich Probe 003, 531

Zusammenfassung der Messwerte:

- Die ungewuchtete Probe 531 unterscheidet sich von der Probe 003 (gewuchtet) nur unwesentlich durch eine Verschiebung der Kurve
- Die Rz Werte werden bei den Proben 004, 003 und 531 bei steigendem Vorschub besser
- Die Rz Werte werden bei der Probe 003 besser ab einem Vorschub von 0,125mm pro Zahn
- Die Rz Werte werden bei 0,004mm Planlauf (Probe 004) ab einem Vorschub von 0,15mm pro Zahn besser
- Die Rz Werte beim Planlauf von 0,004mm (Probe 004) sind bei höheren Vorschüben besser als beim Planlauf von 0,001mm (Probe 22)
- Die Probe 42 mit der Breitschlichtplatte erzeugt die schlechtesten Rz Werte

Die Ergebnisse sind zum Teil überraschend und konnten durch eine Wiederholung der gesamten Messreihe (unter Berücksichtigung einer gewissen Messunsicherheit) bestätigt werden.

Eine klare Aussage zum Verhalten des Rz Wertes kann nicht gemacht werden, dieser müsste theoretisch bei steigendem Vorschub größer werden (vgl. 2.1.2), sinkt aber bei den Proben 531, 003 und 004.

Eine weitere Klärung kann nur durch eine neue Messreihe mit dem Bezugsebenen-Tastsystem erfolgen.

7.2 Profilanalyse Bezugsebenen-Tastsystem

Aufgrund der Ergebnisse des Kufen-Tastsystems wurden sämtliche Messungen nochmals mit einem Bezugsebenen-Tastsystem durchgeführt. Dies ermöglichte auch eine Analyse des ungefilterten P Profils.

7.2.1 Profilanalyse, Mehrzahnfräser

Ein häufig verwendeter Vorschub zum Schlichten ist ein Vorschub pro Zahn von 0,15mm/Z (Stufe 5). Die Probe 21 sollte hier als Grundlage dienen, da die Planlaufeinstellung von 0,001mm als erreichbares Einstelloptimum angesehen werden kann.

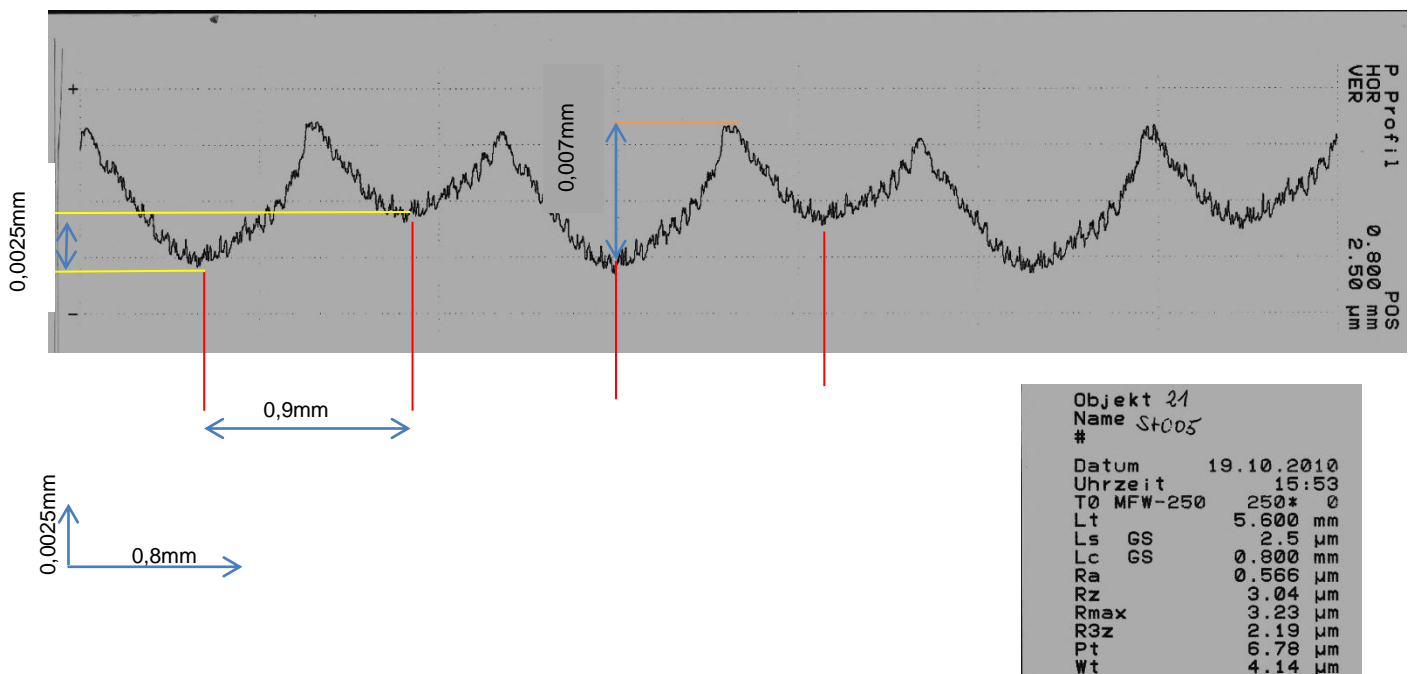


Abbildung 74: Profil Probe 21 Vorschub 0,15mm/Z

Analyse Probe 21:

Vorschub pro Umdrehung $f_{zx} = 0,9\text{mm/U}$ (Glng. 3) , Drehzahl 6000U/min

- Der Vorschub pro Umdrehung kommt als Wellenlänge 0,9mm/U vor
- Der Vorschub pro Zahn ist nicht offensichtlich nachvollziehbar
- Eine Profiltiefe von 0,007mm kann festgestellt werden ($P_t = 6,97$)
- Ein Versatz von 0,0025mm kann bei jeder folgenden Profilform festgestellt werden

Die Profiltiefe wird aufgrund der Grenzwellenlänge und des Gaußfilters wie folgt aufgespalten
Profiltiefe $P_t = 6,78\mu\text{m}$ in Wellentiefe $W_t = 4,14\mu\text{m}$ und Rautiefe $R_{\text{max}} = 3,23\mu\text{m}$.

Interpretation der gemessenen Profilform:

a) Profilform

Der Vorschub pro Umdrehung kann sich dann als Welle abbilden, wenn die Werkzeugaufnahme z.B. nicht achsfluchtig eingewechselt wird.

Rot Spindelachse
Blau Fräs Werkzeug
Schwarz Werkstück

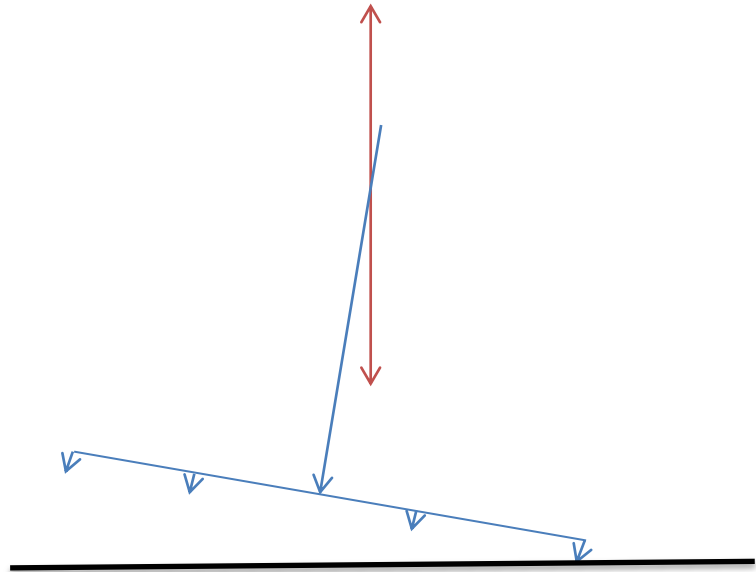


Abbildung 75: Fehler Spindelachse - Werkzeugachse

Die tiefste Schneide erzeugt den untersten Teil des Profils, die folgenden Schneiden sind in der Höhe „treppenförmig“ versetzt und führen zu einer Weitung des Profils d.h. der tatsächliche Planlauf von 0,001mm, welcher am Werkzeugvoreinstellgerät eingestellt wurde, ist beim eingewechselten Werkzeug schlechter.

Betrachtet man die Werkzeugaufnahme, den Steilkegel, genauer, stellt man einige systembedingte Mängel fest. „Die mangelnde Wiederholgenauigkeit führt zu einer unsicheren Fräserlage“. (Europa Fachbuchreihe 2007, 159)

In der Literatur gibt es keine verlässlichen Zahlenwerte bezogen, auf die Wiederholgenauigkeit beim Werkzeugwechsel. Die Wiederholgenauigkeit ist abhängig vom Zusammenspiel der Toleranzen bei der Werkzeugspannung in der Spindel und dem Werkzeugkegel. Ein wesentlicher Einfluss ist auch vom Verschleiß der Kegel zu erwarten.

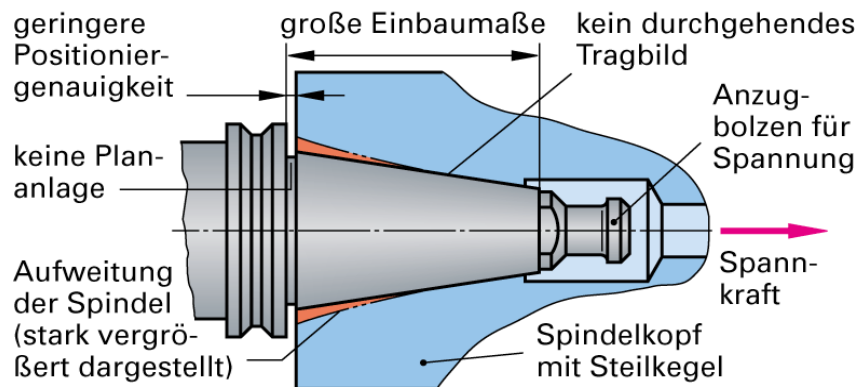


Abbildung 76: Mängel der Steilkegelaufnahme

Diese Problematik einer nicht koaxialen Werkzeugachse zur Spindelachse ist entscheidend für die Oberflächenqualität. Das System „Werkzeugaufnahme Steilkegel“ sollte aufgrund dieser Mängel, für Präzisionsflächen durch eine andere Werkzeugaufnahme ersetzt werden. Als Werkzeugaufnahme sind Systeme mit Plananlage vorzuziehen. Die Hohlenschaftkegelaufnahme (DIN 69893-1), wo eine Wiederholspanngenauigkeit von 0,003mm garantiert wird verspricht eine Verbesserung. (Tabellenbuch 2006, 243)

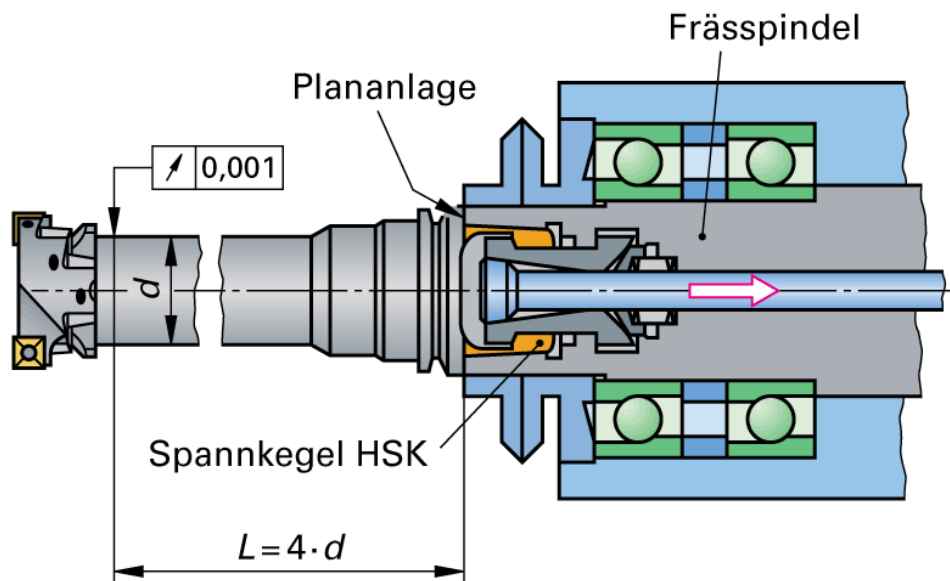


Abbildung 77: Hohlenschaftkegelaufnahme

b) Profilversatz von 0,0025mm.

Der axiale Versatz des Profils kann nur durch eine Schwingung erzeugt werden.

Die Schwingungen entstehen zum einen durch Maschinenschwingungen (Eigenschwingungen) und sind somit selbsterregend. Sie entstehen an rotierenden Teilen, insbesondere an der Hauptspindel. Schwingungen können aber auch vom Antrieb, unwuchten Massen oder dem Regelverhalten der Maschine erzeugt werden.

Bei der Fertigung kommen noch Zerspanungsschwingungen hinzu. Diese Schwingungen sind fremderregt und wirken sich je nach Situation (Spanungsquerschnitt, Schnittkräfte) unterschiedlich aus. (Witte 1991, 270)

Die Zerspanungsschwingungen werden durch den Zahneintritt in das Werkstück erregt. Die Schwingung ist eine erzwungene Schwingung mit der Anregungsfrequenz Zähnezahl mal Drehzahl. (Paucksch 2008, 230)

Tatsächlich werden sich unterschiedliche Schwingungen überlagern.

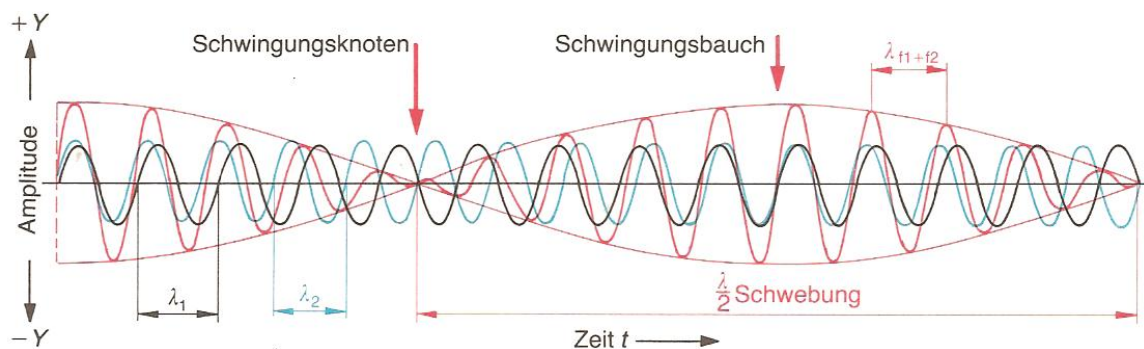


Abbildung 78: Überlagerung von Schwingungen

Schwingungsmessungen bei einer Fräsoption zeigen folgenden Charakter.

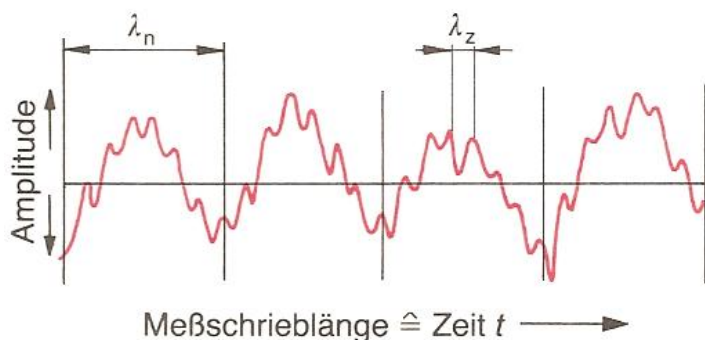


Abbildung 79: Frässhwingung

λ_n Wellenlänge pro Umdrehung

λ_z Wellenlänge pro Zahn

Folgende Abbildung zeigt einen Fräsversuch bei unterschiedlichen Drehzahlen und gleichen Zahnvorschüben. Am P-Profil können unterschiedliche Wellenlängen und Amplituden festgestellt werden. Die überlagerte Schwingung (grüne Linien) ist drehzahlabhängig.

Stufe 1 Vorschub pro Zahn 0,08mm, Vorschub pro Umdrehung 0,48mm n=2000U/min

Stufe 3 Vorschub pro Zahn 0,08mm, Vorschub pro Umdrehung 0,48mm n=4000U/min

Stufe 5 Vorschub pro Zahn 0,08mm, Vorschub pro Umdrehung 0,48mm n=5000U/min

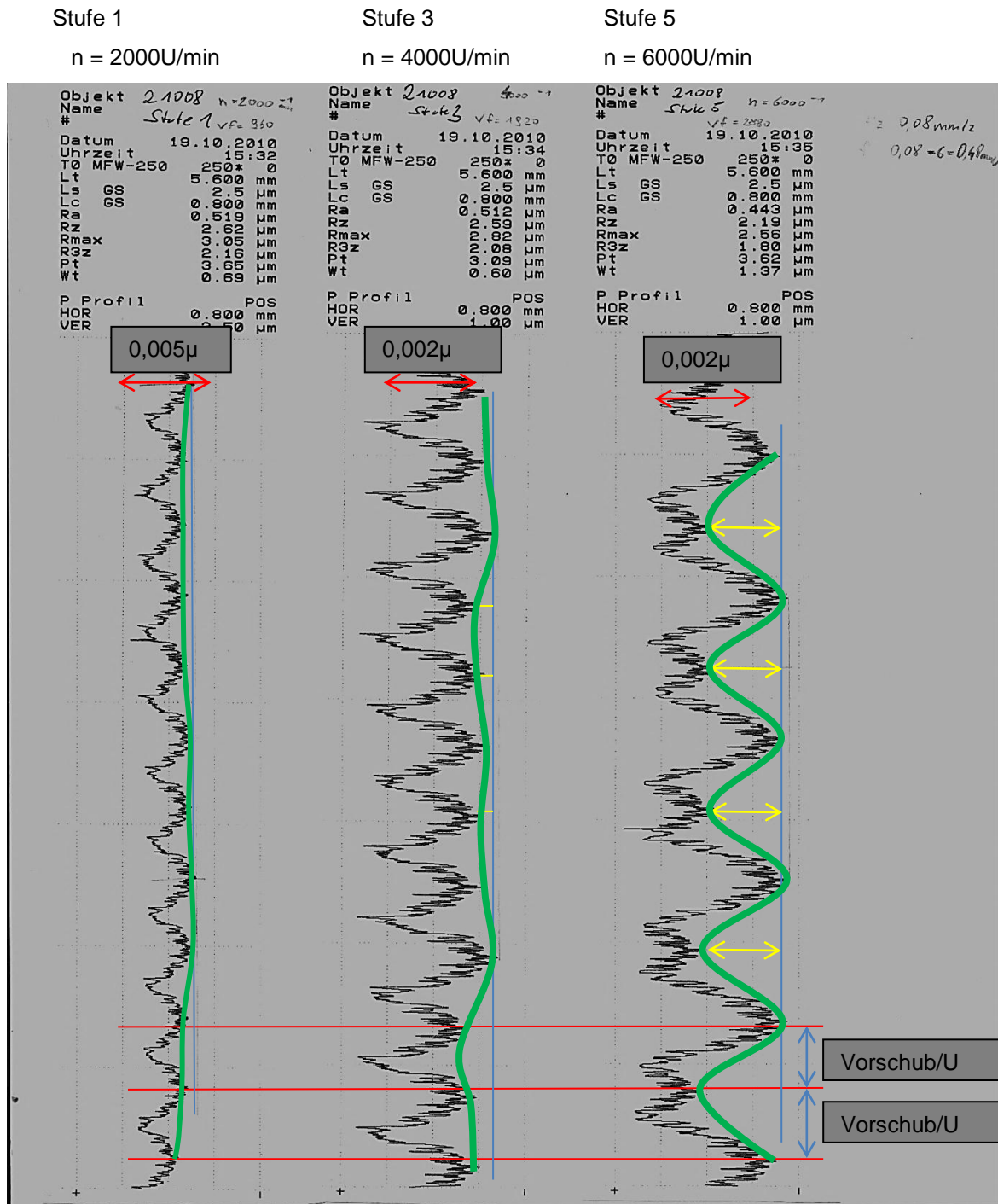


Abbildung 80: Schwingungen bei unterschiedlichen Drehzahlen

7.2.2 Profilvergleich Bezugsebenen-Tastsystem – Kufen-Tastsystem

Als Vergleich wird wie im Abschnitt 7.2.1 Profil 21 Stufe 5 herangezogen.

Messung mit dem Kufen-Tastsystem.

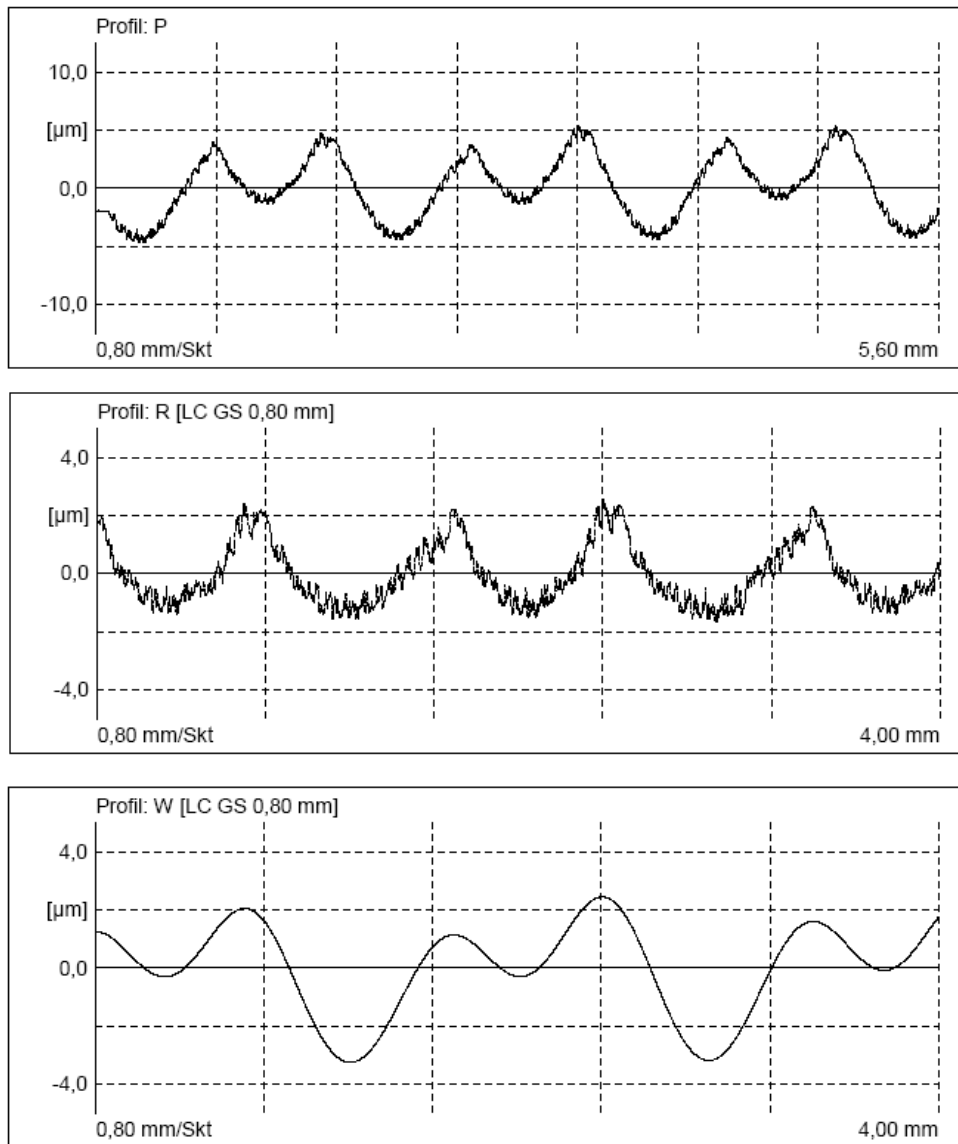


Abbildung 81: Profil und Kennwerte Probe 21Vorschub 0,15mm/Z

Rmax	4,21	μm
Wt	5,68	μm
Pt	10,06	μm

Im R-Profil wurden die Schwingungen herausgefiltert, die Schwingung ist im W-Profil ersichtlich.

Vergleicht man nun die Werte vom Kufen-Tastsystem mit dem Bezugsebenen-Tastsystem ergeben sich folgende Unterschiede:

	Bezugsebenen-Tastsystem	Kufen-Tastsystem
Ra	0,566	0,88
Rz	3,04	3,81
Rmax	3,23	4,21
Wt	4,14	5,66
Pt	6,78	10,06

Tabelle 9: Vergleich Bezugsebenen-Tastsystem - Kufen-Tastsystem

Die Werte des Bezugsflächensystems sind wesentlich kleiner, wobei der Pt Wert (Profiltiefe Primärprofil) zu beachten ist. Die Rauheitswerte werden aus dem Primärprofil berechnet. Bei der Profiltiefe Pt ergibt sich beim Bezugsebenen-Tastsystem ein Wert, der um etwa 30% niedriger ist.

Dieser Unterschied muss geklärt werden, da dieser Unterschied sehr groß ist und die Werte nicht mehr ohne weiteres verglichen werden können.

Interpretation der Messunterschiede:

Die überraschend große Wellenlänge bei Fräsprofilen ergibt einen Einfluss der Gleitkufe welche als Messbasis eine Hubbewegung durchführt und deshalb das Messergebnis verzerrt.

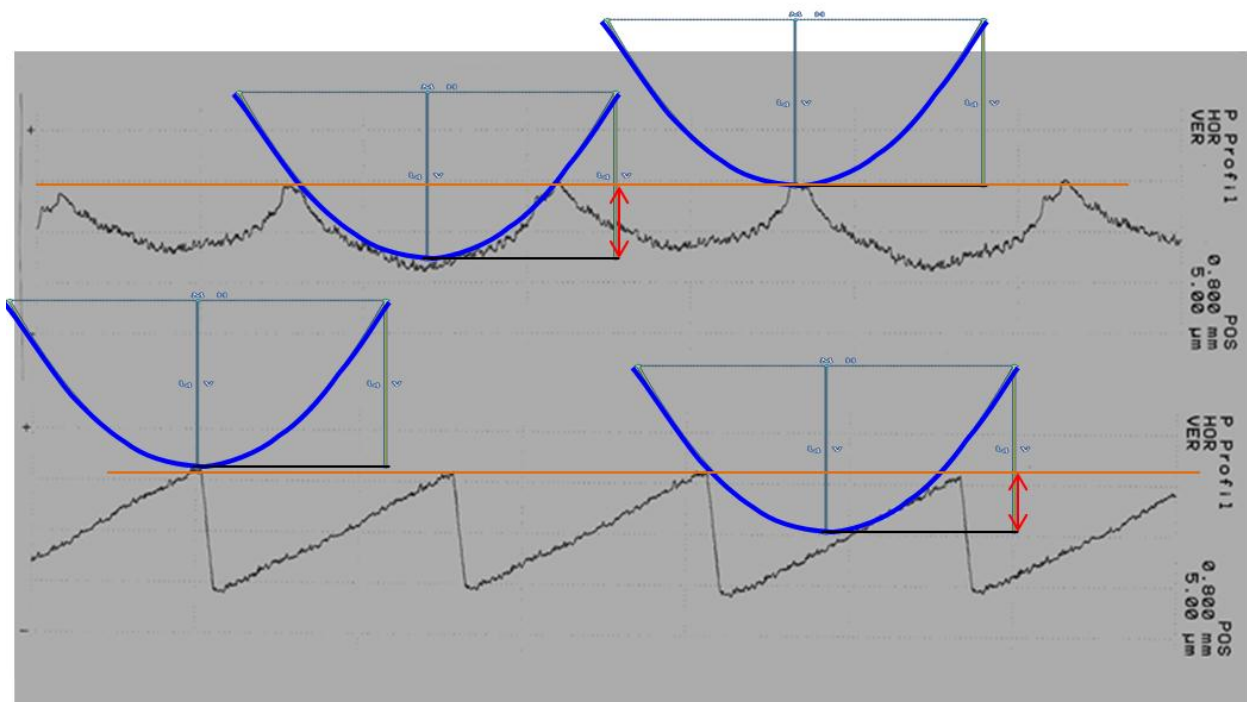


Abbildung 82: Profilverzerrung Kufen-Tastsystem

Vergleicht man nun beide P-Profile ergeben sich folgende Unterschiede:

Das obere Profil zeigt das gemessene P- Profil mit dem Kufen-Tastsystem, das untere Profil zeigt das gleiche direkt gemessene Profil mit dem Bezugsebenen-Tastsystem.

(Probe 21 Stufe 7)

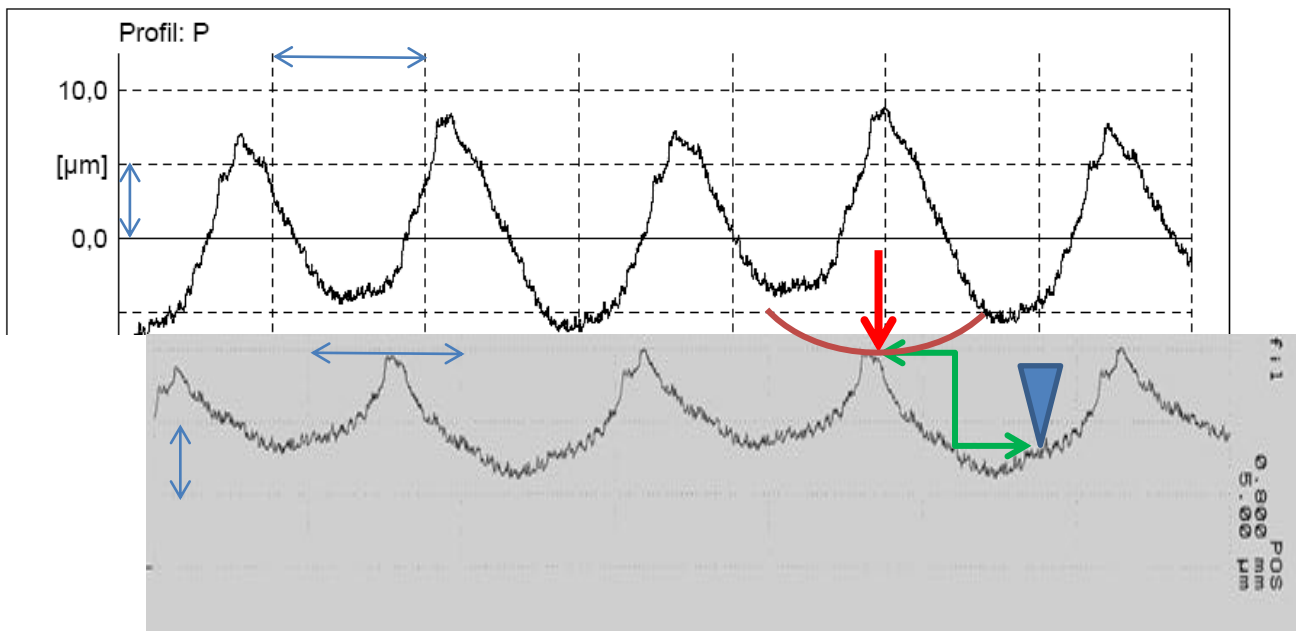


Abbildung 83: Überhöhung beim Kufen-Tastsystem zum Bezugsebenen-Tastsystem

Der rote Pfeil links symbolisiert die Gleitkufe, das blaue Dreieck die Tastspitze, bei einem Vorschub pro Zahn von 0,2mm (1,2mm/U) ergibt sich eine starke Profilüberhöhung.

Hier wurde ein Abstand Gleitkufe Tastspitze von 0,8mm angenommen. (Mahr GmbH 2006, Prospekt M2)

7.2.3 Kennwertvergleich Bezugsebenen-Tastsystem, Kufen-Tastsystem

Zuerst wird der Vergleich der Profiltiefe Pt der beiden Messprinzipien untersucht. Der gleichmäßige Anstieg beim Bezugsebenen-Tastsystem ist aufgrund des steigenden Vorschubes erklärbar. Beim Kufen-Tastsystem gibt es große Abweichungen von diesen Werten. Dies erklärt sich aufgrund der Überhöhung durch den Kufenfehler. (Kufenabsenkung)

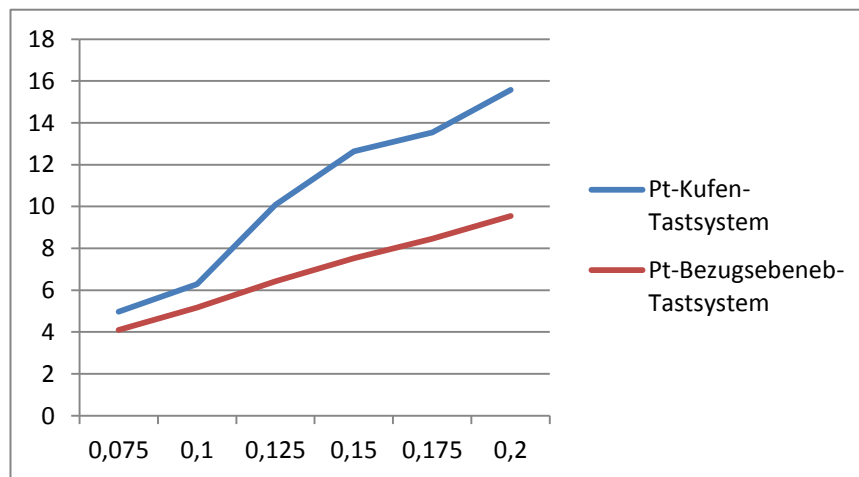


Diagramm 10: Probe 21 Vergleich Pt Kufen-Tastsystem – Bezugsebenen-Tastsystem

Nach der Filterung ergeben sich bei beiden Messsystemen ähnliche Werte von Rz bei kleinen Vorschüben. Bei höheren Vorschüben ergibt sich wie im P Profil eine auseinanderdriften der Werte. Eine Abflachung der Werte ergibt sich durch den Wellenfilter bei größeren Wellenlängen. (vgl. 3.3.4)

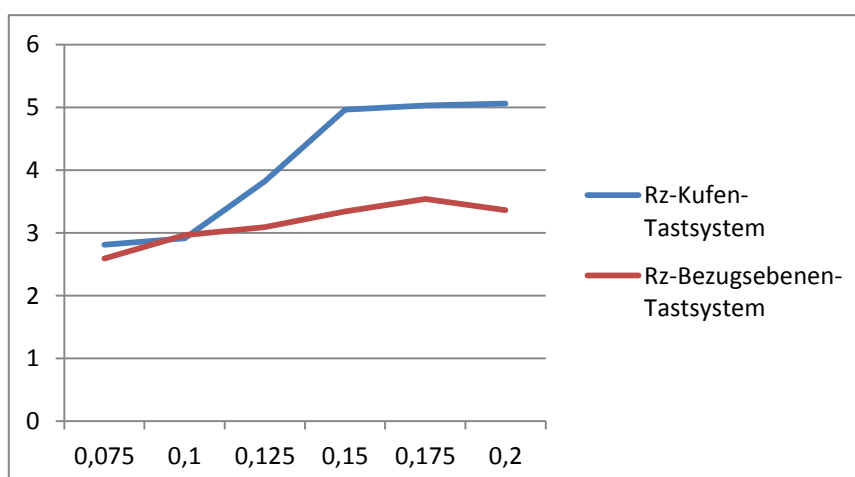


Diagramm 11: Probe 21 Vergleich Rz Kufen-Tastsystem – Bezugsebenen-Tastsystem

7.2.4 Theoretische Berechnung der Kufenabsenkung

Mithilfe der Formel für den Kreisabschnitt kann die theoretische Breite b (Absenkung) berechnet werden.

Kreisabschnitt		
<p>Kreisabschnitt mit $\alpha \leq 180^\circ$</p>	<p> A Fläche d Durchmesser l_B Bogenlänge l Sehnenlänge </p>	<p> b Breite r Radius α Mittelpunktswinkel </p>
<p>Beispiel:</p> <p> $b = 15,1 \text{ mm}; l = 52 \text{ mm}; l_B = 62,83 \text{ mm};$ $r = ?; A = ?$ </p> $r = \frac{b}{2} + \frac{l^2}{8 \cdot b}$ $= \frac{15,1 \text{ mm}}{2} + \frac{(52 \text{ mm})^2}{8 \cdot 15,1 \text{ mm}}$ $= 29,93 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$ $A = \frac{l_B \cdot r - l \cdot (r - b)}{2}$ $= \frac{(62,83 \cdot 30) \text{ mm}^2 - 52 \cdot (30 - 15,1) \text{ mm}^2}{2}$ $= 555,1 \text{ mm}^2$	<p>Fläche</p> $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} - \frac{l \cdot (r - b)}{2}$ $A = \frac{l_B \cdot r - l \cdot (r - b)}{2}$	<p>Sehnenlänge</p> $l = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ $l = 2 \cdot \sqrt{b \cdot (2 \cdot r - b)}$
<p>Kreisabschnitt mit $\alpha > 180^\circ$</p>		<p>Breite</p> $b = \frac{l}{2} \cdot \tan \frac{\alpha}{4}$ $b = r - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$
		<p>Bogenlänge</p> $l_B = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180^\circ}$
		<p>Radius</p> $r = \frac{b}{2} + \frac{l^2}{8 \cdot b}$

Kufenabsenkung b : $b = r - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$ (Glng. 6)

b ... Kufenabsenkung mm
 r ... Kufenradius mm
 l ... Vorschub/Umdrehung mm/U

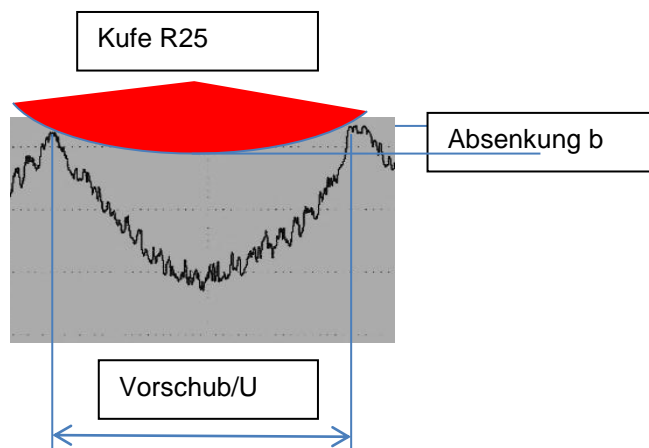


Abbildung 85: Kufenversatz

Nach der Gln. 6 ergeben sich folgende Werte:
 Kufenradius 25mm (Mahr GmbH 2006, Prospekt M2)

Stufe	Vorschub pro Zahn	Vorschub pro Umdrehung „l“	Absenkung „b“
1	0,05	0,3	0,45µm
2	0,075	0,45	1µm
3	0,1	0,6	1,8µm
4	0,125	0,75	2,8µm
5	0,15	0,9	4µm
6	0,175	1,05	5,5µm
7	0,2	1,2	7,2µm

Tabelle 10: Absenkung der Gleitkufe

Diese Absenkung lässt sich nicht direkt auf den Rauheitswert umrechnen, da der Gaußfilter ab einer Sinuswellenlänge von 0,8mm nur noch 50% im Rauheitsanteil abbildet. Weiters ist die Überzeichnung in Abhängigkeit vom Abstand der Tastspitze zur Gleitkufe zu sehen. Fällt die Form der Überzeichnung relativ steil aus, wird ein höherer Anteil in die Rauheit fallen. Unberücksichtigt bleiben auch langwellige Schwingungen, welche sich aufgrund der Filterung aber kaum im Rauheitsprofil abbilden.

7.2.5 Theoretische Berechnung der Profiltiefe

Die Schneidplatten haben einen Radius von etwa 13mm. Dieser Radius trägt das Material an der Oberfläche ab und bewirkt eine gewisse Rautiefe. Da die Schneiden trotz der axialen Einstellung von 0,001mm im eingespannten Zustand einen größeren Planlauffehler haben (Achsenfehler) wirkt die unterste Schneide vereinfacht profilgebend. (vgl. 7.2.1)

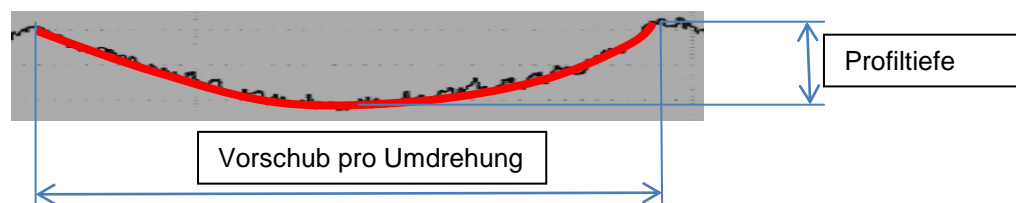


Abbildung 86: Zusammenhang Vorschub/U mit der Profiltiefe

Die Unterste der Schneiden erzeugt die Oberfläche mit Zahn Z1. Die anderen Schneiden sind zwar im Schneidbereich am Umfang beteiligt, die Oberfläche wird aber in der vereinfachten Vorstellung nicht von den Schneiden Z2 bis Z6 beeinflusst.

Umgekehrt wird ein sehr schlechter Planlauf (Planschlag) keine weitere Verschlechterung der Oberfläche ergeben. Sollte der Planschlag klein genug sein wird z.B.: bei Z4 die Spitze abgeschnitten und eine kleinere Profiltiefe erreicht.

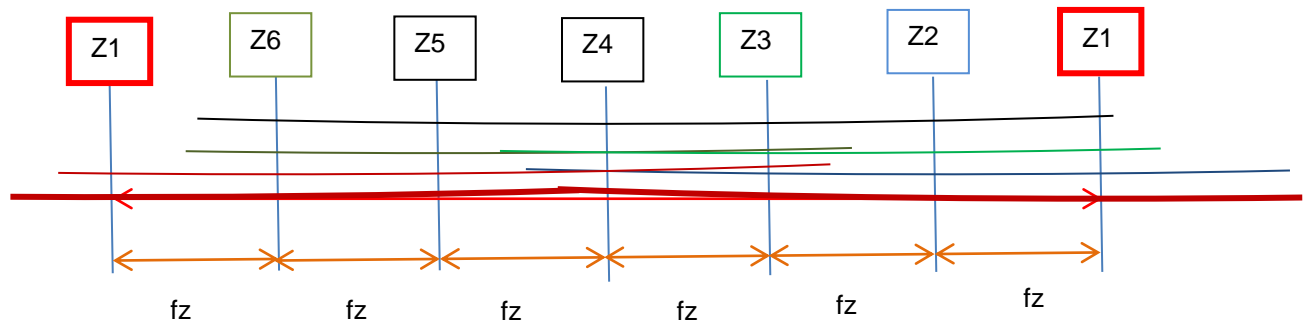


Abbildung 87: Zusammenhang Planlauf Profiltiefe

Mit Hilfe Glng. 6 kann folgende Berechnung angestellt werden.

Wenn nur ein Zahn (Z1), nämlich der tiefste Zahn, die Oberfläche erzeugt ergibt sich folgende Theoretische Profiltiefe Pt.

Vorschub / Umdrehung $l = 6 \times fz$

Schneidplattenradius $r = 13$

$fz = 0,05$	P theoretisch = $0,87\mu\text{m}$
$fz = 0,075$	P theoretisch = $1,95\mu\text{m}$
$fz = 0,1$	P theoretisch = $3,46\mu\text{m}$
$fz = 0,125$	P theoretisch = $5,41\mu\text{m}$
$fz = 0,15$	P theoretisch = $7,79\mu\text{m}$
$fz = 0,175$	P theoretisch = $10,6\mu\text{m}$
$fz = 0,2$	P theoretisch = $13,9\mu\text{m}$

Tabelle 11: Theoretische Profiltiefe in Abhängigkeit vom Schneidplattenradius

Hat der nachfolgende Zahn Z2 von Z1 einen max. Planschlag von B zu Z1 erreicht oder mehr, ist er für die Oberfläche nicht relevant. Die Werte von Tabelle 13 wären maßgeblich.

Ist der Planschlag aber kleiner als B, schneidet Zahn Z2 in die Profilspitzen von Z1, die Oberfläche verbessert sich also.

$$l = 4 \times fz$$

$$r = 13$$

b = Breite des Kreisabschnittes nach Glng. 6

$$B = P_{\text{theoretisch}} - b \quad (\text{Glng. 7})$$

$fz = 0,05$	P theoretisch	$0,87\mu\text{m}$	-	$b \ 0,39$	= B $0,48\mu\text{m}$
$fz = 0,075$	P theoretisch	$1,95\mu\text{m}$	-	$b \ 0,87$	= B $1,08\mu\text{m}$
$fz = 0,1$	P theoretisch	$3,46\mu\text{m}$	-	$b \ 1,54$	= B $1,92\mu\text{m}$
$fz = 0,125$	P theoretisch	$5,41\mu\text{m}$	-	$b \ 2,4$	= B $3,01\mu\text{m}$
$fz = 0,15$	P theoretisch	$7,79\mu\text{m}$	-	$b \ 3,46$	= B $4,33\mu\text{m}$
$fz = 0,175$	P theoretisch	$10,6\mu\text{m}$	-	$b \ 4,71$	= B $5,89\mu\text{m}$
$fz = 0,2$	P theoretisch	$13,9\mu\text{m}$	-	$b \ 6,16$	= B $7,74\mu\text{m}$

Tabelle 12: Planschlag B des nächsten Zahnes Z2 ohne Einfluss auf die Oberfläche

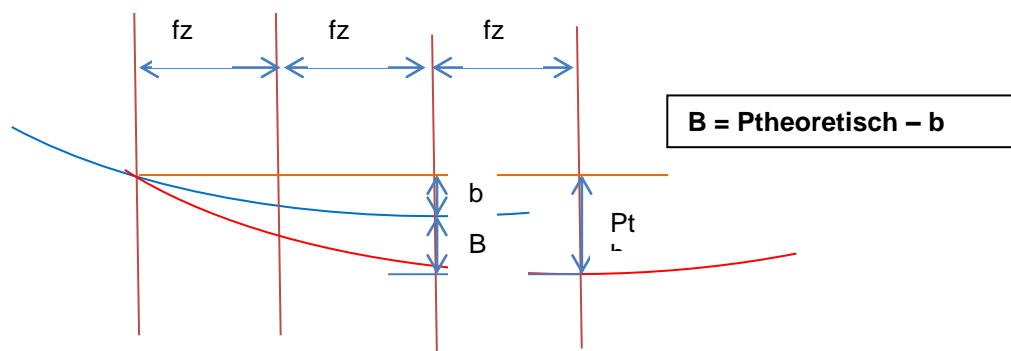


Abbildung 88: Berechnung des maximalen Zahnschlages

Analog zu obiger Berechnung kann auch Z3 zu Z1 betrachtet werden d.h. ist der Planschlag kleiner als B schneidet Zahn Z3 in die Profilspitzen von Z1, die Oberfläche verbessert sich also.

$$l = 2 \times fz$$

$$R = 13$$

$$B = P_{\text{theoretisch}} - b$$

b = Breite des Kreisabschnittes

fz = 0,05	P theoretisch	0,87μ	-	b 0,1	= B 0,77μ
fz = 0,075	P theoretisch	1,95μ	-	b 0,22	= B 1,73μ
fz = 0,1	P theoretisch	3,46μ	-	b 0,39	= B 3,07μ
fz = 0,125	P theoretisch	5,41μ	-	b 0,6	= B 4,81μ
fz = 0,15	P theoretisch	7,79μ	-	b 0,87	= B 6,92μ
fz = 0,175	P theoretisch	10,6μ	-	b 1,18	= B 9,42μ
fz = 0,2	P theoretisch	13,9μ	-	b 1,54	= B 12,36μ

Tabelle 13: Planschlag B des übernächsten Zahnes Z3 ohne Einfluss auf die Oberfläche

Hat der Zahn Z4 einen größeren Lauffehler als die theoretische Profiltiefe, spielt er für die Bildung der Oberfläche keine Rolle mehr.

7.2.6 Vergleich der theoretischen Profiltiefe mit den gemessenen Werten

Wenn man die theoretische Profiltiefe P_{th} mit dem gemessenen Werten vom Bezugsflächensystem vergleicht, ergeben sich folgende Abweichungen.

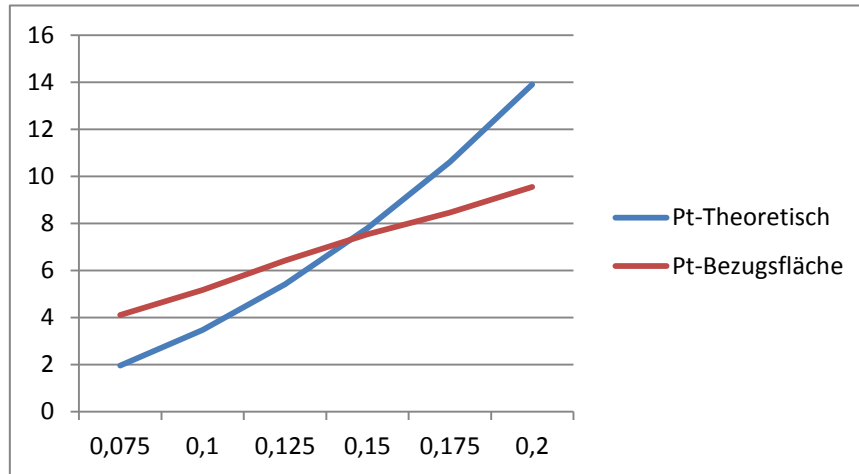


Diagramm 12: Vergleich Theoretische Profiltiefe mit den Messwerten

Bei einer genauen Analyse der Unterschiede müssen 2 Vorschubbereiche unterschieden werden.

a) Untersuchung der Unterschiede von Pt bei kleinen Vorschüben

Bei kleinen Vorschüben im Bereich von 0,075mm/Z bis 0,125mm/Z ist die theoretische Profiltiefe besser als die gemessenen. Bei sehr kleinen Vorschüben ist nur eine Schneide, die unterste profilgebend (vgl.7.2.5). Deutlich erkennbar ist der Vorschub pro Umdrehung ($f=0,45\text{mm}$) und die eine Schwingung.

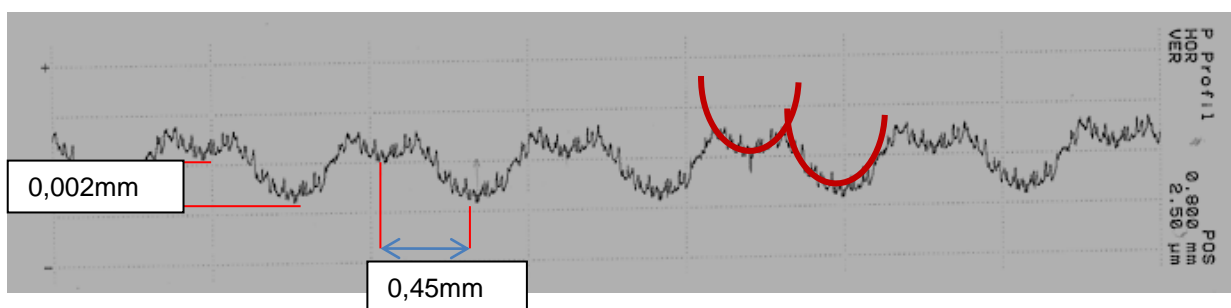


Abbildung 89: Probe 21 Stufe 1; Oberflächenbildung $f_z = 0,075\text{mm}$, $f = 0,45\text{mm/U}$

Die Schwingung von ca. 0,002mm hat eine Wellenlänge von 0,45mm d.h. diese Schwingung verschlechtert den Pt Wert und wird sich auch im Rz Wert ausdrücken (vgl. 3.3.3)

b) Untersuchung der Unterschiede von Pt bei großen Vorschüben

Auf der **Probe 21 Stufe 7**, ist ein regelmäßiges Profil aber geweitetes Profil sichtbar. Die Zähne schneiden sehr regelmäßig treppenförmig ein (vgl.7.2.5).

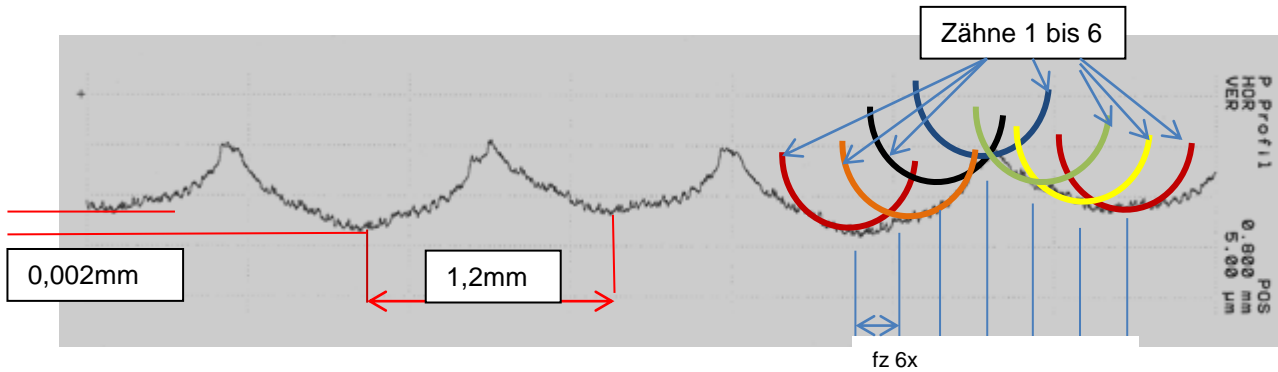


Abbildung 90: Probe 21 Stufe 7; Oberflächenbildung $f_z = 0,2\text{mm}$, $f = 1,2\text{mm/U}$

Das Bild mit eingefügten Zähnen ist natürlich nur eine idealisierte Vorstellung, dass alle Zähne am Profil beteiligt sind. Tatsächlich kann dies nicht genau herausgemessen werden, ob wirklich alle 6 Zähne mitschneiden. Bei dieser Überlegung spielt auch der Radiallauf des Werkzeuges eine Rolle.

Die Symmetrie lässt aber darauf schließen, dass die Eingriffsverhältnisse von mehreren Zähnen sehr regelmäßig erzeugt werden.

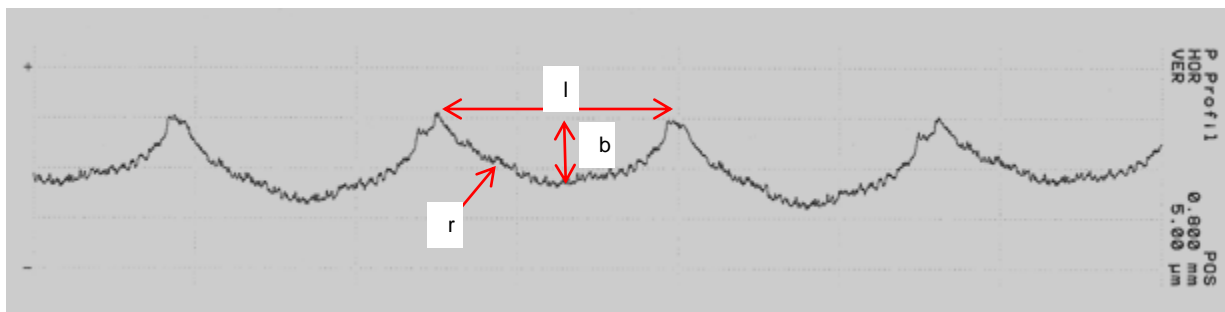


Abbildung 91: Auf Weitung des Profils

Nach der Radius Berechnung (Tabellenbuch 2006, 28) des Kreisabschnittes

$$r = \frac{b}{2} + \frac{l^2}{8 \cdot b} \quad (\text{Glng. 7})$$

r... theoretischer Profilradius

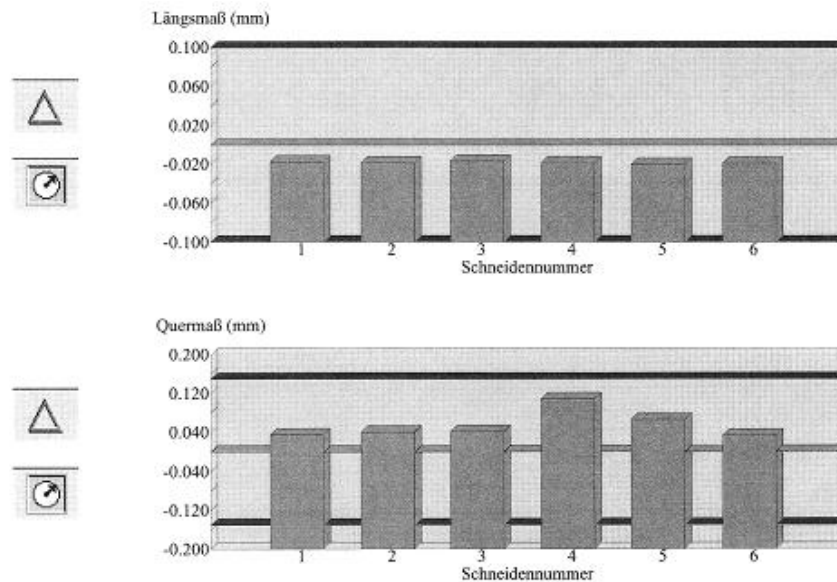
b... Profiltiefe

l... Sehnenlänge

Setzt man für $b=1,2\text{mm}$ für $b=0,007\text{mm}$ ergibt sich ein theoretischer Radius **r 25,7mm**.

Der Radius ist also wesentlich größer als der tatsächliche Radius an der Schneidkante von 13mm. Diese Messung beweist, dass mehrere Zähne profilgebend beteiligt sind.

Die Werkzeugeinstellungen sind mit einem Planlauf von 0,001mm so gut wie möglich eingestellt. Das Quermaß von Schneide 4 unterscheidet sich aber um 0,087mm von Schneide 3. Trotzdem sieht man keine Auswirkung auf der Oberfläche, dies ist wahrscheinlich deshalb möglich da die Schneide 4 im oberen Profilbereich schneidet.



Meßwert	Stufe	SNr.	Modus	Soll	OT	UT	Ist	Tol.
Längsmaß	1	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	1	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.031	X
Radius	1	0					0.445	X
Längsmaß	2	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	2	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.025	X
Radius	2	0					11.210	X
Längsmaß	3	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.981	X
Quermaß	3	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.023	X
Radius	3	0					11.105	X
Längsmaß	4	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	4	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.110	X
Radius	4	0					11.260	X
Längsmaß	5	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	5	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.052	X
Radius	5	0					5.475	X
Längsmaß	6	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.981	X
Quermaß	6	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.034	X
Radius	6	0					5.370	X

Abbildung 92: Werkzeugvermessung Probe 21

Auf der **Probe 003 Stufe 7**, Planlauf 0,003mm ist eine ungleichmäßige Aufweitung des Profils erkennbar.

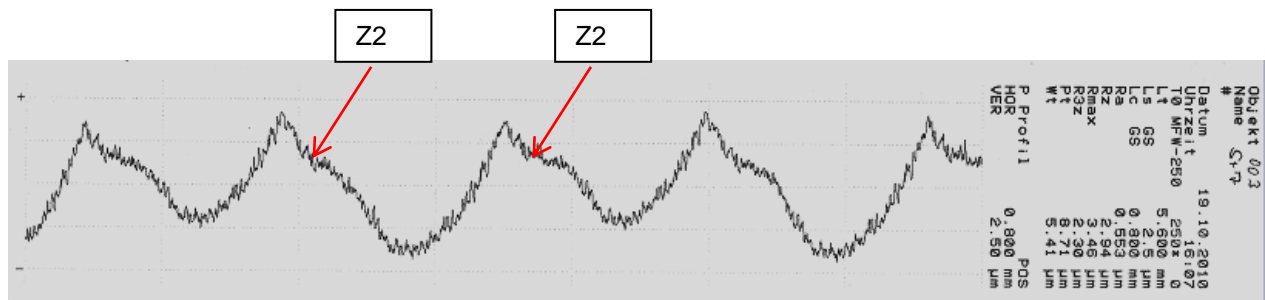


Abbildung 93: Probe 003 Stufe 7; $f_z = 0,2\text{mm/Z}$, $f = 1,2\text{mm/U}$

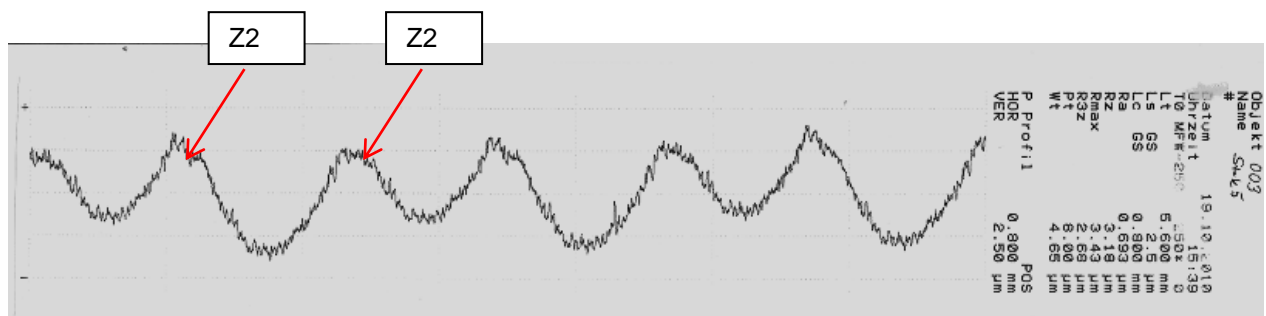


Abbildung 94: Probe 003 Stufe 5; $f_z = 0,15\text{mm/Z}$, $f = 0,9\text{mm/U}$

Die Ausprägung des Profils ändert sich bei anderen Vorschüben, ist aber auf einen vorschneidenden Zahn zurückzuführen. Dieser Vorschnitt kann durch den Zahn 2 bewirkt werden, welcher mehr als 0,06mm im Radius versetzt ist (vgl. Abbildung 95 Quermaß Z2). Zahn 2 schneidet also den benachbarten Zähne Z1 und Z3 vor. (ca. 30% vom Vorschub pro Zahn)
In diesem Fall ist der Radialschlag ausschlaggebend.

Interessant ist, dass dieser Fehler zu einer besseren Profiltiefe führt, weil die Wellenspitze sozusagen weggeschnitten wird (vgl. 7.1.2)

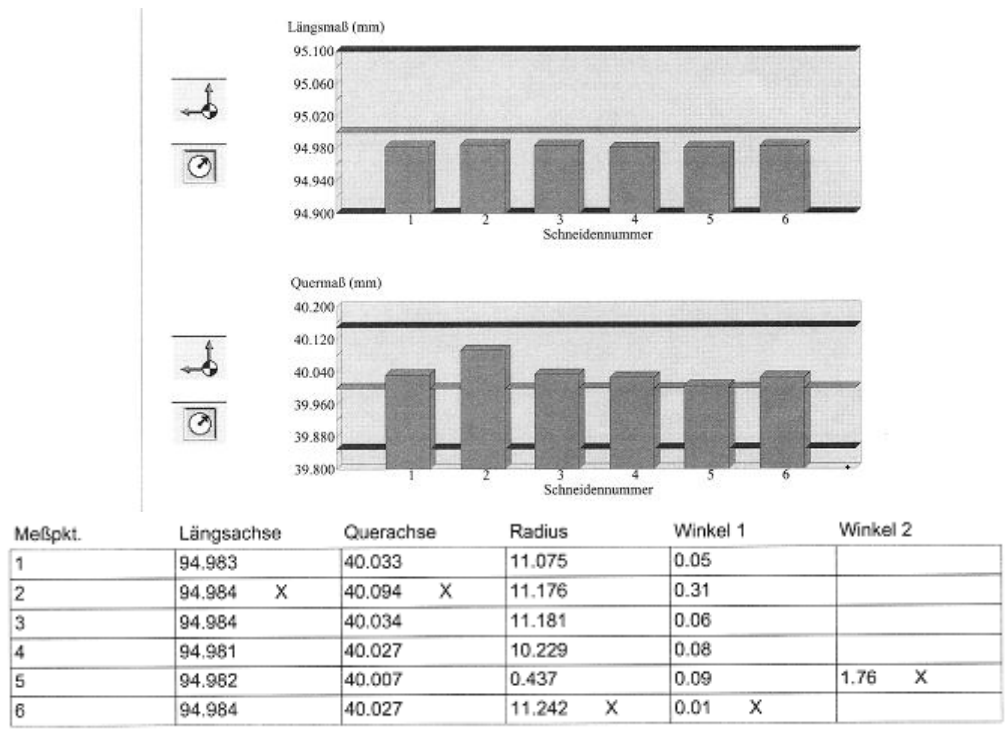


Abbildung 95: Werkzeugvermessung - Probe 003

Der Radialschlag (Querachse) des Werkzeuges kann sich aber auch geringer auswirken wenn z.B. Schneide 2 auf einem kleineren Durchmesser schneidet also nicht vorschneidet.

7.2.7 Profilanalyse, Fräsen mit der Breitschlichtplatte

Die Probe 41 Stufe 5 soll hier beispielhaft behandelt werden.

Der Vorschub beträgt 0,15mm/Z, die Schneide hat einen Radius von 100mm und steht 0,05mm tiefer als die anderen Zähne.

Es entsteht ein Sägezahnprofil durch die Schiefstellung der Schneide.

Die horizontale Länge beträgt 0,9mm (0,15mmx6 Zähne), die Profilhöhe etwa 0,009mm.

Mithilfe der Winkelfunktion ergibt sich eine Schiefstellung von 0,57°.

Objekt	41
Name	S45
#	
Datum	19.10.2010
Uhrzeit	16:20
T0 MFW-250	250* 0
Lt	5.600 mm
Ls GS	2.5 µm
Lc GS	0.800 mm
Ra	1.099 µm
Rz	7.66 µm
Rmax	8.57 µm
R3z	**** µm
Pt	9.84 µm
Wt	4.05 µm

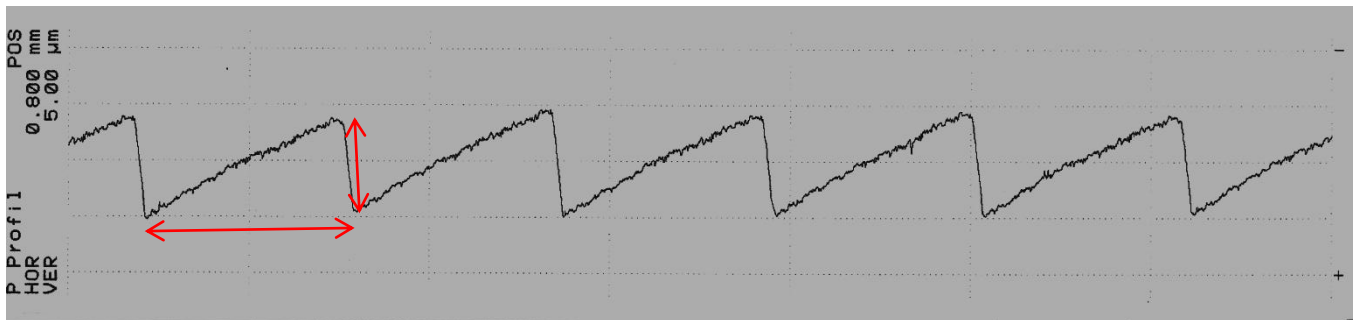


Abbildung 96: Breitschlichtplatte Profil 41 Stufe 5 Bezugsflächentastung

Betrachtet man das gleiche Profil gemessen mit dem Kufen-Tastsystem ergibt sich folgendes Ergebnis.

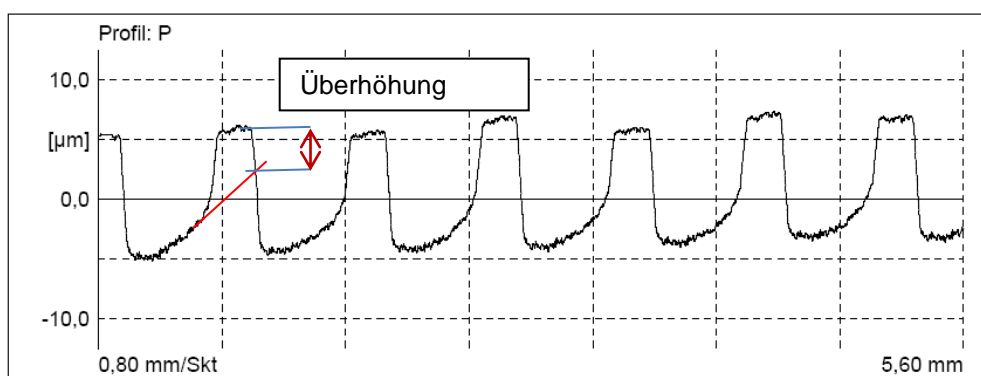


Abbildung 97: Breitschlichtplatte Profil 41 Stufe 5 Kufen-Tastsystem

Es ergibt sich eine Überhöhung durch die Kufenabsenkung.

(vgl. 7.2.4)

Die Höhe des Primärprofils Pt ist um 2,69µm größer als beim der Bezugsebenen-Tastsystem.

Die Überhöhung durch die Kufenabsenkung wird bei größeren Vorschüben sichtbar.

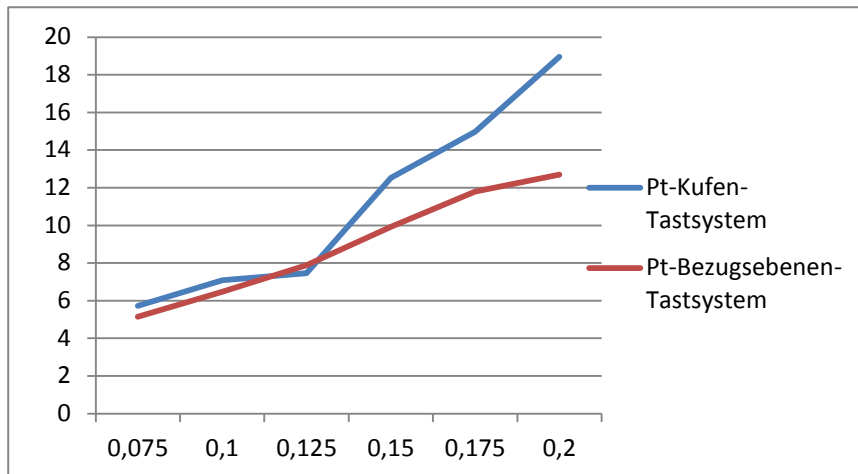


Diagramm 13: Vergleich der Profiltiefen Probe Breitschichtplatte

Das gefilterte R-Profil wird aufgrund des verfälschten P-Profiles ebenfalls verzerrt.

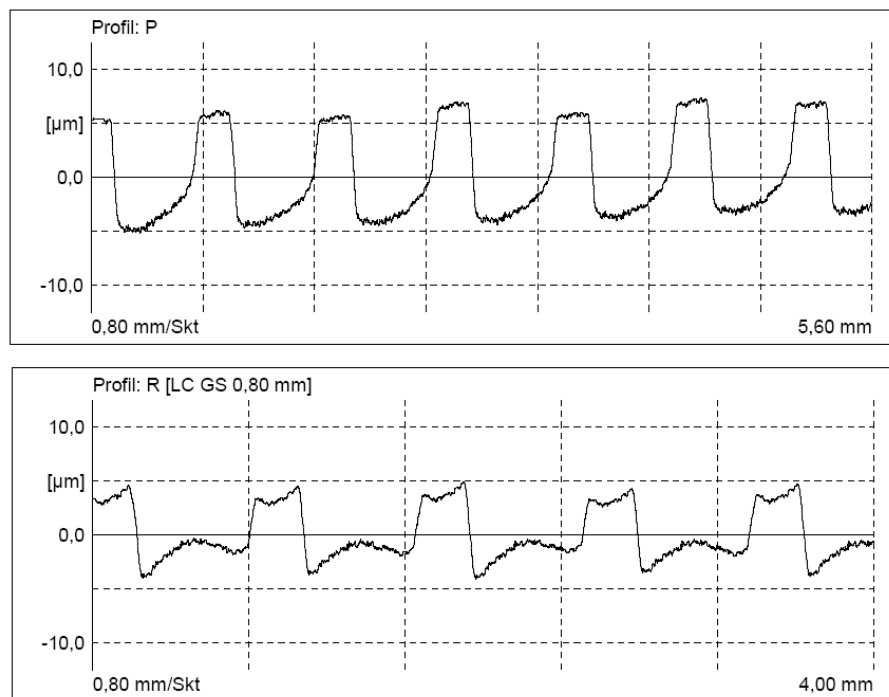


Abbildung 98: Vergleich P-Profil - R-Profil

Analog dem Profiltiefe Pt verhält sich auch der Rz Wert die Verfälschung wird ab einem Vorschub von 0,125mm/Z deutlich.

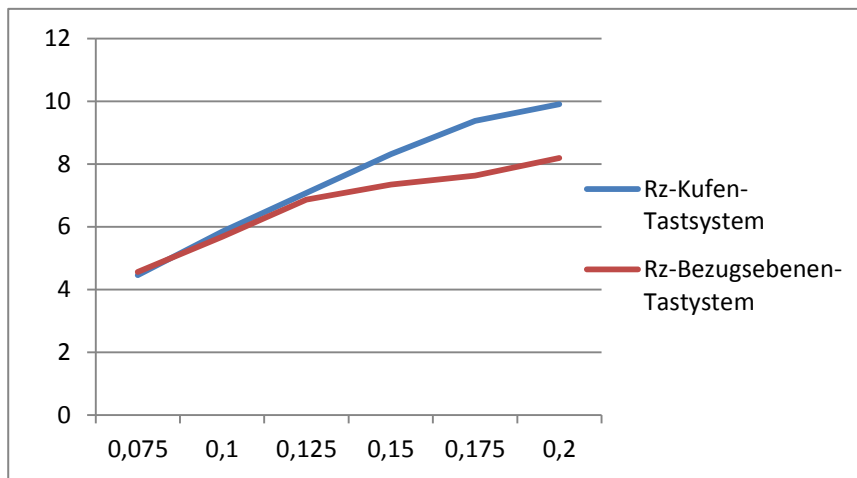


Diagramm 14: Probe 42 Vergleich Kufen-Tastsystem - Bezugsebenen-Tastsystem

7.2.8 Tragfähigkeit des Profils

Aus der Abbott Firestone Kurve soll die Tragfähigkeit des Profils betrachtet werden. Als Schnitttiefe wurde 1µm gewählt. Die Messungen sind Bezugsflächenmessungen.

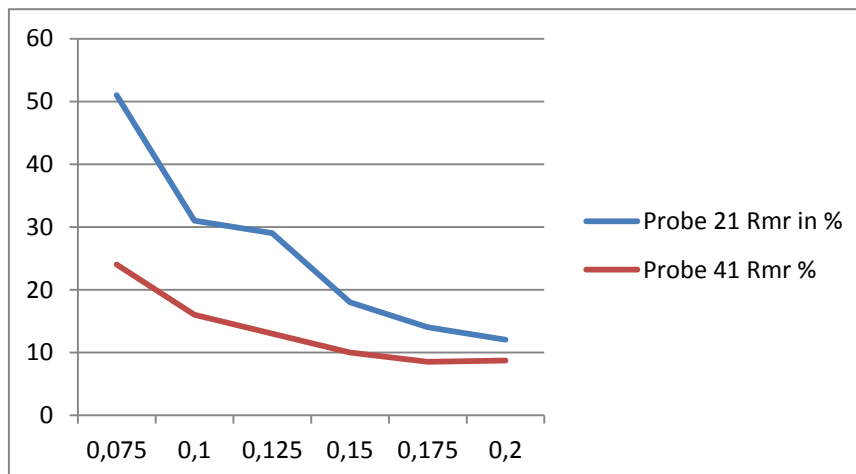


Diagramm 15: Vergleich der Tragfähigkeit Probe 21 mit 41

Wie zu erwarten war nimmt die Tragfähigkeit des Profils bei größeren Vorschüben ab. Die Kurven laufen entgegen der Profiltiefen d.h. größere Pt Werte bzw. Rz Werte bedeuten eine kleinere Tragfähigkeit.

7.3 Gegenüberstellung wesentlicher Kennwerte

Abschließend sollte nochmals der Versuch unternommen werden, aufgrund der Messergebnisse Zusammenhänge zwischen den Kennwerten festzustellen. Die Probe 21 dient als Basis (Planlauf 0,001mm).

Die Werte Pt theoretisch, Pt Bezugsebenen-Tastsystem, Rz Bezugsebenen-Tastsystem und Rz Kufen-Tastsystem werden verglichen. Pt theoretisch wurde mit einem eingreifenden Zahn gerechnet.

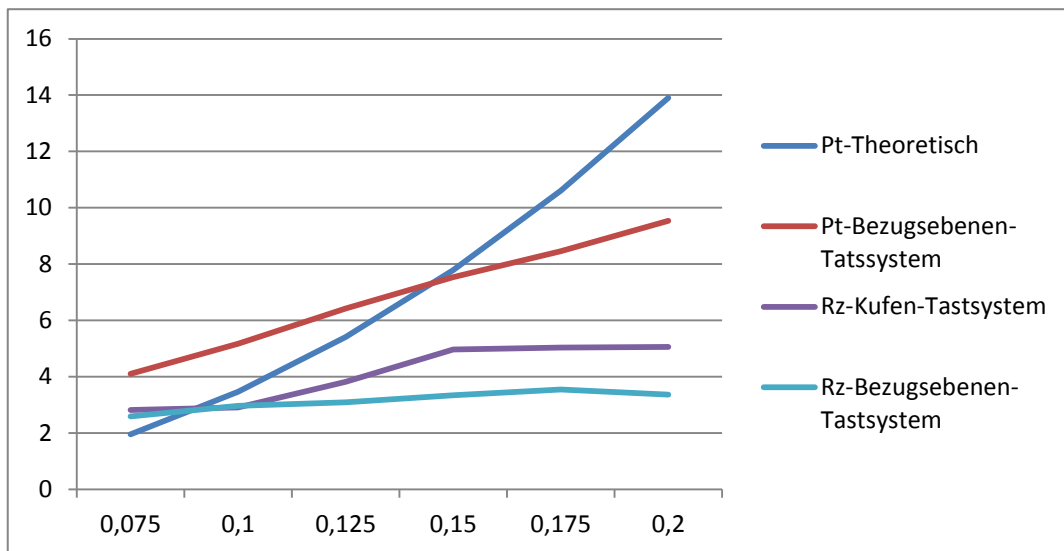


Diagramm 16 Vergleich Ptheoretisch, Pt, Rz Kufen- und Rz Bezugsebenen-Tastsystem

Folgende Erkenntnisse können aufgrund der Untersuchungen abgeleitet werden:

- Pt Theoretisch ist aufgrund von Schwingungen anfangs schlechter als gemessene Werte Pt
- Pt Theoretisch ist aufgrund des Mitschneidens mehrerer Zähne bei höheren Vorschüben schlechter als der gemessene Wert Pt
- Pt Bezugseben-Tastsystem steigt bei höheren Vorschüben, die Rz Werte Bezugsebenentastsystem steigen nur leicht an, d.h. die längere Welligkeit wird durch den elektrischen Filter ausgefiltert
- Rz Kufen-Tastsystem liefert bei höheren Vorschüben schlechter Werte als das Bezugsebenen Tastsystem, dies ist durch den Kufenfehler erklärbar, bei kleinen Vorschüben sind die Werte annähernd gleich

Direkte Zusammenhänge zwischen den Werten sind nicht feststellbar und aufgrund der unklaren Planlaufsituation und Radiallaufsituation beim eingewechselten Werkzeug und des Schwingungsverhaltens der Maschine auch nicht möglich.

8. Messunsicherheit

Die Messunsicherheit ist ein Maß für die Genauigkeit der Messung und kennzeichnet die Streuung oder den Bereich derjenigen Werte, die der Messgröße als Schätzwert für den wahren zugewiesen werden können. (Klein 2008, S. 987)

Überprüft wird das Kufentastgerät M2.

Als systematische Messabweichung wird die Differenz des Rz Wertes vom Geometrienormal ermittelt.

Ra	2,23	µm
Rmax	9,45	µm
Rz	9,23	µm

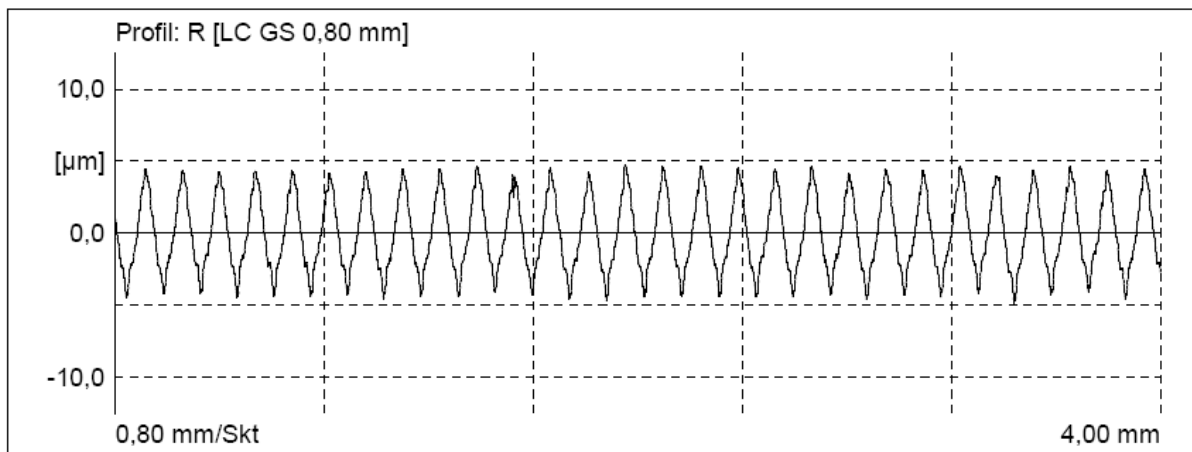


Abbildung 99: Kalibriermessung

Das Geometrienormal hat einen Rz Wert von 9,22µm und einen Ra Wert von 2,1µm. Nach der Kalibrierung wird ein Rz Wert von 9,23µm erreicht werden. Auf eine Korrektur von 0,01µm wird verzichtet.

Die Messunsicherheit des Schätzwertes (Anzeige am Messgerät) wird von mehreren Unsicherheiten beeinflusst.

8.1 Die Wiederholgenauigkeit vom Messgerät

Die Mittelwerte wurden durch 10 Wiederholmessungen auf der gleichen Messstelle ermittelt.

\bar{X} Rz	2,35	µm
S Rz	0,02	µm
Min Rz	2,32	µm
Max Rz	2,40	µm
R Rz	0,09	µm

Die Unsicherheit kann unter Berücksichtigung einer Normalverteilung mit der Formel

$$u = \frac{a}{\sqrt{4}} \quad (\text{Glng. 7})$$

a... Spannweite μm

berechnet werden. (Nisch 2010, 12) Als a wird $R_{z\text{max}} - R_{z\text{min}}$ gesetzt.

Es ergibt sich eine Unsicherheit:

$$u = 0,04\mu\text{m}.$$

8.2 Rauheitsstreuung der Fräsfläche

Es wurden 12 Messungen durchgeführt, wobei auf der gleichen Fläche das Messgerät jedesmal neu aufgesetzt und neu ausgerichtet wurde. Die Messung wurde mittig normal auf die Fräsrichtung durchgeführt.

$\bar{X} R_z$	1,59	μm
S R_z	0,03	μm
Min R_z	1,52	μm
Max R_z	1,63	μm
R R_z	0,11	μm

Nach Glng. 7 ergibt sich eine Messunsicherheit $u = 0,06\mu\text{m}$.

8.3 Ermittelte Messunsicherheit

Berechnet man nun die kombinierte Messunsicherheit (Klein 2008, 989)

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (\text{Glng. 8})$$

Ergibt sich für die kombinierte Messunsicherheit u_c ein Wert von $0,072\mu\text{m}$.

Zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U muss u_c mit 2 multipliziert werden.
(Vertrauensniveau 95%)

$$U = \pm 0,144\mu\text{m}.$$

Beim vollständigen Messergebnis ist also eine Unsicherheit von $\pm 0,144\mu\text{m}$ zu berücksichtigen. Weitere Messunsicherheiten, bedingt durch die Schwankungen beim Werkzeugwechsel des Fräasers wurden nicht berücksichtigt, dies würde eine eigene Untersuchung nach sich ziehen.

9. Erkenntnisse und Diskussion der Messergebnisse

Um die Ergebnisse besser zu verstehen ist es vorteilhaft den Fräsprozess und den Messvorgang getrennt zu betrachten.

9.1 Einflüsse durch den Fräsprozess

Die Oberflächenqualität plangefräster Flächen wird durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst.

a) Schneidkantengeometrie

Die Schneidkante ist als Eckenradius ausgeführt, welcher direkt auf der Oberfläche wirkt. Der theoretische Wert kann nicht im Zusammenhang mit dem gemessenen Wert der Eckenformtiefe gebracht werden.

$$e = \frac{f_z^2}{8r} \quad (\text{vgl. 2.1.3})$$

Rz entspricht e bei einer theoretisch periodischen Ausprägung des Profils ohne Planschlag. Der gemessene Wert Rz 3,04µm (vgl. 7.2.3) steht einer theoretischen Rauhtiefe von e=0,2µm gegenüber.

Sehr große Radien, wie sie beim Breitschlichten zum Einsatz kommen (R100) haben noch größere Abweichungen.

Der gemessene Wert Rz 7,66µm (vgl. 7.1.8) steht einer theoretischen Rauhtiefe von e=0,0028µm gegenüber.

Bei sehr großen Radien wirkt sich die Ungenauigkeit der „planen“ Ausrichtung zur Oberfläche sehr stark aus, es entsteht ein Sägezahnprofil mit wesentlich schlechteren Oberflächenkennwerten. (vgl. 7.1.8)

b) Planlaufeinstellung der Schneiden am Werkzeug

Das Werkzeug kann relativ problemlos (mit etwas Übung) auf a=0,001mm am Voreinstellgerät eingestellt werden. (vgl. 4.2 und 4.3)

Die gemessenen Werte können nicht mit der theoretischen Formel R=e+a (vgl. 2.1.3) in Verbindung gebracht werden. Es konnten sogar bessere Rz Werte bei einem schlechteren planeingestellten Werkzeug gemessen werden (vgl. 7.1.2 und 7.2.6)

Natürlich spielt auch die Reihenfolge der Abweichungen eine Rolle d.h. ist z.B. ein Zahn um 0,004mm verstellt und die anderen sind im Genauigkeitsbereich von 0,001mm. (vgl. 7.5.2)

Der Radiallauf spielt ebenfalls eine Rolle, diese Ungenauigkeiten können sogar die Oberflächenqualität verbessern (vgl. 7.2.6). Voraussagen über die Auswirkung der Laufeinstellungen auf die entstehende Oberflächenqualität sind aber funktionell nicht möglich, da die Werkzeugwechselgenauigkeit zufällig ist und großen Einfluss hat.

c) Tatsächlicher Planlauf der Schneiden am eingespannten Werkzeug

Aufgrund der periodischen Ausprägung des Primärprofiles, konnte das Wirken eines einzigen Zahnes als oberflächenentscheidend nachgewiesen werden. Der tiefste Zahn erzeugt die Oberfläche. Die anderen Zähne sind trotz der exakten Planlaufeinstellung von 0,001mm nicht oder erst bei größeren Vorschüben wirksam. (vgl. 7.2.5)

Dieser Einfluss ist wesentlich stärker wirksam als die Einflüsse der Planeinstellung oder der Schneidkanten geometrie. (vgl. 7.2.1)

Der effektive Planlauf des Werkzeuges ist also wesentlich schlechter als beim tatsächlich einwirkenden Werkzeug.

Der Mehrzahnfräser wirkt wie ein Einzahnfräser bei kleinen Vorschüben (vgl. 7.2.6) oder ein Fräser mit vorgestellter Breitschlichtplatte, bei großen Vorschüben sind auch die anderen Zähne Oberflächenwirksam (vgl. 7.2.6)

d) Wuchtqualität

Bei der Versuchsdrehzahl von 6000U/min konnte nur eine geringe Verschlechterung der Oberflächenqualität bei einem ungewuchteten Werkzeug festgestellt werden (vgl. 7.1.2). Eine weitere Untersuchung bei verschiedenen Drehzahlen und Wuchtgüten würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

e) Bearbeitung ohne Kühlmittel

Bei Versuchen ohne Kühlmittel kommt es zu starken Ausreißern bei den Kennwerten. Dieser Effekt wird durch einen unsauberen Spanablauf (leichte Einschmelzungen an der Oberfläche) erklärbar. Dieser Effekt ist optisch erkennbar und für eine Präzisionsfläche nicht tolerierbar (vgl. 7.1.1)

f) Schwingungen

Am Primärprofil konnten eindeutig Schwingungen erkannt werden. Die Schwingungen konnten bis zu einer Größenordnung von 2,5µm bei 6000U/min nachgewiesen werden (vgl. 7.2.1) Es

konnte gezeigt werden, dass der Schwingungseinfluss bei verschiedenen Drehzahlen sehr unterschiedlich ist. (vgl. 7.2.1 b)

Die Schwingungsproblematik ist von der Erregerfrequenz (Zähnezahl, Drehzahl) und der Erregerkraft (Zahneintritt ins Werkstück) abhängig. Hier sind sicher kleine Schnitttiefen und Vorschübe bzw. Schnittkräfte vorteilhaft. Die Problematik von Eigenschwingungen (System Maschine) ist eben maschinenabhängig und deren Verhalten kann nur durch Versuche (oder FEM Analysen) bei unterschiedlichen Schnittkräften getestet werden.

Für den Praktiker sind die Stabilität der Spannung, die Werkzeugauskragung, die Wahl der Fräsbahn und die Schnittwerte wesentlich und beeinflussbar.

Maschinenseitig ist vor allem der Lagerzustand der Hauptspindel interessant, Lagerverschleiß wirkt sich direkt auf die Oberflächenqualität aus. (Witte 1991, S273)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Fräsoption ein sehr überraschendes Profil erzeugt. Das Profil hat eine Wellenlänge, die dem Vorschub pro Umdrehung entspricht. Interessanterweise wird weder in der Literatur noch bei Herstellern darauf hingewiesen.

9.2 Aussagekraft der Oberflächenkennwerte

Ziel dieser Arbeit ist es einen Zusammenhang zwischen Schnittwerten (hauptsächlich des Vorschubes) und der Planeinstellung des Werkzeuges herzustellen.

Folgende wesentliche Punkte konnten herausgearbeitet werden:

- Beim Kufen-Tastsystem, welches in der Fertigung an der Maschine eingesetzt werden kann, kommt es aufgrund der langwelligen Ausprägung des Profils zu einem wesentlichen Messfehler aufgrund der Absenkung der Gleitkufe (vgl. 7.2.4). Kufen-Tastsysteme erzeugen nur bei kurzwelligen Profilen (Drehen, Schleifen, Fräsen mit kleinen Vorschüben...) annähernd gleiche Ergebnisse wie ein Bezugsebenen-Tastsystem.
- Eine Interpretation der Fräsfläche aufgrund von Messungen mit dem Kufen-Tastsystem ist nur bei kleinen Vorschüben möglich (vgl. 7.3) bei großen Vorschüben beschränken sich die Kennwerte auf Vergleichswerte und zeigen nicht die tatsächlichen Abweichungen
- Für die richtige Interpretation der Oberflächenbeschaffenheit ist eine Bezugsflächenmessung notwendig (vgl. 3.2.4).

- Langwellige Anteile des Profils werden aufgrund des elektrischen Filters nicht zur Gänze im Rauheitsprofil dargestellt (vgl. 3.3.4) d.h. die Wellenlängen, welche beim Fräsen erzeugt werden, sind im Bereich der genormten Grenzwellenlänge und darüber.
- Die Normgerechte Grenzwellenlänge von 0,8mm (vgl. 3.3.7) ist zu kurz um durch Rauheitskennwerte Funktionsaussagen zu treffen.
- Der langwellige Schwingungsanteil ist im Rauheitsprofil bei großen Vorschüben ausgefiltert und wird deshalb im Rauheitsprofil nicht ausgedrückt. Bei kleinen Vorschüben wirken sich die Schwingungen im Rauheitsprofil aus (vgl. 7.2.1)
- Rauheitskennwerte sollten im Zusammenhang mit Welligkeitskennwerten gesehen werden. Profilkennwerte und Profilausdrucke vom Primärprofil sind zum Verständnis des Fräsvorganges und der Funktion der Fläche (z.B. Dichtheit, Tragfähigkeit) notwendig.
- Ein Zusammenhang unterschiedlicher Vorschübe und Einstellungen kann nur mit der Profiltiefe P_t und dem Bezugsebenen-Tastsystem hergestellt werden (vgl. 7.3)
- Die optische Beurteilung der Oberfläche kann z.B. subjektiv ein schlechtes Ergebnis sein, die Rauheitswerte am Oberflächenprüfgerät sind aber gut, weil der beschriebene Messfehler des Kufen-Tastsystems und die Filterung einen starken Einfluss haben.

10. Ausblick und Potentiale

Das gesamte System Maschine, Werkzeug, Spannung, Werkstück muss betrachtet werden um eine Weiterentwicklungen des Fräsprozesses zu ermöglichen.

Es gibt aber auch einige Entwicklungsmöglichkeiten für den Werkzeughersteller um gefräste Oberflächenqualitäten zu verbessern.

- Genau eingestellte Mehrzahnfräswerkzeuge sind in Verbindung mit hochgenauen Werkzeugaufnahmen mit Plananlage sinnvoll. Der tatsächliche Planlauf der Schneiden, gespannt in der Maschinenspindel ist entscheidend.
- Eine Entwicklung um den Planlauf bei eingewechseltem Fräswerkzeug tatsächlich einzustellen würde deutlich bessere Oberflächenqualitäten erzeugen.
- Einzahnfräser oder Fräser mit Breitschlichtplatten kompensieren Achsfehler des Werkzeuges zur Hauptspindel, diese Werkzeuge müssten bei großen Schneidkantenradien aber zur Werkstückoberfläche ausgerichtet werden.

- Eine Kassette zur Ausrichtung der Breitschlichtplatte, in Verbindung mit einer Messmöglichkeit des Fehlers direkt am Werkstück, würde ein werkzeugtechnisches Optimum darstellen.
- Schneidkanten sollten einen Plattenradius von 25mm haben (gleich Kufenradius des Messgerätes) und gleichzeitig muss ein Vorschub pro Umdrehung von 0,8mm gewählt werden. Dies führt zu einer mechanischen Filterung der Welligkeit. Allgemein ist zu beachten, dass der Abstand des Messpunktes zum Gleitpunkt der Kufe gleich dem Vorschub pro Umdrehung zu wählen ist. Natürlich ist der Schwingungseinfluss im Bereich des Rz Wertes gegeben (vgl. 7.2.1) durch Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen lässt sich aber das beste Ergebnis d.h. der kleinste Schwingungseinfluss ermitteln.

Der letzte Punkt muss natürlich kritisch betrachtet werden, da lediglich durch die Ausführung des Kufen-Tastsystems eine Subtraktion der Wellenförmigkeit der Oberfläche erreicht wird. Auf der anderen Seite ist der Kufenradius und Abstand zum Messpunkt eine systembedingte Tatsache und die Oberflächenabtastung mit den Kufen-Tastsystemen übliche Messpraxis.

Die Problematik der Schwingungen kann vom Werkzeughersteller nur zum Teil beeinflusst werden. Das Schwingungsverhalten wirkt sich optisch auf das Fräsergebnis aus, oft weniger in den Rauheitskennwerten, ist aber auch für das Verschleißverhalten des Schneidstoffes maßgeblich.

Für den Werkzeughersteller sind in diesem Zusammenhang Masse und Steifigkeit wichtig, es können grundsätzliche Aussagen getroffen werden.

- Das Fräswerkzeug sollte eine hohe Masse haben um dämpfend auf die Schwingungen zu wirken. Es wirkt sich günstig auf das Abklingverhalten der erregten Schwingung aus und reduziert die Wirkung des eingeleiteten Stoßes.
- Das Fräswerkzeug sollte eine hohe Federsteifigkeit haben, um eine günstige hohe Eigenfrequenz zu erzielen.

Zerspanungsschwingungen können nicht verhindert werden. Für den Anwendungstechniker sind die Potentiale im Bereich Schnittwerte und Lage der Fräsbahn die wesentliche Herausforderung um die Frequenz bzw. Erregerkraft zu beeinflussen. In der Praxis wirken sich natürlich auch der Einfluss der Aufspannung und das Maschinensystem auf das Schwingungsverhalten aus.

Eine ausführliche Behandlung der Schwingungsproblematik würde eine eigene Untersuchung nach sich ziehen, dies würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

Normen

DIN EN ISO-Normen betreffend Rauheit:
3274 Gerätebeschreibung, Definition von Begriffen, Messbedingungen
4287 Definitionen der Kenngrößen
4288 Auswertebedingungen
4760 Ordnungssysteme für Gestaltabweichungen nach DIN 4760
4772 Tasterkennzeichnung
5436 -1 Beschreibung von Normalen
5436-2 Software-Normale (evtl.)
11562 Beschreibung der Filtercharakteristik
12179 Kalibrieren von Tastschnittgeräten
13565 Definition und Auswertung von Rk-Parametern(falls benutzt)
DIN 4771 Bestimmung der Profiltiefe Pt

Anhang

Anhang 1: Oberflächenmesswerte Kufen-Tastsystem

Vorschubstufen Proben Nr. (22 und 003), Stufen 1 bis 9

22 1-9

1: Ra	0,43	µm
1: Rmax	2,19	µm
1: Rz	2,03	µm
2: Ra	0,55	µm
2: Rmax	2,96	µm
2: Rz	2,81	µm
3: Ra	0,55	µm
3: Rmax	2,97	µm
3: Rz	2,79	µm
4: Ra	0,92	µm
4: Rmax	4,14	µm
4: Rz	3,85	µm
5: Ra	1,12	µm
5: Rmax	5,39	µm
5: Rz	5,13	µm
6: Ra	1,11	µm
6: Rmax	5,89	µm
6: Rz	5,22	µm
7: Ra	1,21	µm
7: Rmax	5,92	µm
7: Rz	5,30	µm
8: Ra	1,14	µm
8: Rmax	7,39	µm
8: Rz	5,53	µm
9: Ra	1,21	µm
9: Rmax	6,93	µm
9: Rz	5,27	µm

003 1-9

1: Ra	0,69	µm
1: Rmax	2,98	µm
1: Rz	2,89	µm
2: Ra	0,49	µm
2: Rmax	3,05	µm
2: Rz	2,47	µm
3: Ra	0,87	µm
3: Rmax	3,67	µm
3: Rz	3,55	µm
4: Ra	1,35	µm
4: Rmax	6,07	µm
4: Rz	5,54	µm
5: Ra	1,15	µm
5: Rmax	5,83	µm
5: Rz	5,05	µm
6: Ra	1,13	µm
6: Rmax	4,69	µm
6: Rz	4,59	µm
7: Ra	0,91	µm
7: Rmax	4,58	µm
7: Rz	4,14	µm
8: Ra	0,89	µm
8: Rmax	4,69	µm
8: Rz	3,88	µm
9: Ra	0,90	µm
9: Rmax	3,88	µm
9: Rz	3,58	µm

11 1-9

1: Ra	0,84	µm
1: Rmax	8,48	µm
1: Rz	4,39	µm
2: Ra	0,58	µm
2: Rmax	2,92	µm
2: Rz	2,78	µm
3: Ra	0,73	µm
3: Rmax	6,26	µm
3: Rz	3,65	µm
4: Ra	1,05	µm
4: Rmax	4,78	µm
4: Rz	4,48	µm
5: Ra	1,10	µm
5: Rmax	5,51	µm
5: Rz	5,10	µm
6: Ra	1,11	µm
6: Rmax	5,86	µm
6: Rz	5,00	µm
7: Ra	1,15	µm
7: Rmax	6,05	µm
7: Rz	5,45	µm
8: Ra	1,23	µm
8: Rmax	6,76	µm
8: Rz	5,87	µm
9: Ra	1,20	µm
9: Rmax	7,51	µm
9: Rz	5,61	µm

21 008

1: Ra	0,36	µm
1: Rmax	1,83	µm
1: Rz	1,71	µm
2: Ra	0,69	µm
2: Rmax	3,01	µm
2: Rz	2,91	µm
3: Ra	0,73	µm
3: Rmax	3,02	µm
3: Rz	3,01	µm
4: Ra	0,67	µm
4: Rmax	3,01	µm
4: Rz	2,97	µm
5: Ra	0,50	µm
5: Rmax	2,68	µm
5: Rz	2,50	µm
6: Ra	0,42	µm
6: Rmax	2,14	µm
6: Rz	1,97	µm
7: Ra	0,62	µm
7: Rmax	2,75	µm
7: Rz	2,61	µm
8: Ra	0,59	µm
8: Rmax	2,48	µm
8: Rz	2,43	µm
9: Ra	0,54	µm
9: Rmax	2,68	µm
9: Rz	2,56	µm

004 1-9

1: Ra	0,76	µm
1: Rmax	3,65	µm
1: Rz	3,41	µm
2: Ra	0,52	µm
2: Rmax	2,71	µm
2: Rz	2,59	µm
3: Ra	0,99	µm
3: Rmax	3,90	µm
3: Rz	3,74	µm
4: Ra	1,16	µm
4: Rmax	5,04	µm
4: Rz	4,73	µm
5: Ra	1,23	µm
5: Rmax	6,15	µm
5: Rz	5,65	µm
6: Ra	1,14	µm
6: Rmax	4,94	µm
6: Rz	4,62	µm
7: Ra	1,01	µm
7: Rmax	4,89	µm
7: Rz	4,25	µm
8: Ra	0,95	µm
8: Rmax	4,51	µm
8: Rz	3,86	µm
9: Ra	0,99	µm
9: Rmax	4,12	µm
9: Rz	3,75	µm

41 1-9

1: Ra	0,82	µm
1: Rmax	3,73	µm
1: Rz	3,50	µm
2: Ra	0,83	µm
2: Rmax	4,40	µm
2: Rz	4,37	µm
3: Ra	1,41	µm
3: Rmax	5,87	µm
3: Rz	5,62	µm
4: Ra	1,76	µm
4: Rmax	7,24	µm
4: Rz	6,59	µm
5: Ra	1,74	µm
5: Rmax	7,09	µm
5: Rz	6,49	µm
6: Ra	2,14	µm
6: Rmax	8,98	µm
6: Rz	8,58	µm
7: Ra	2,03	µm
7: Rmax	10,63	µm
7: Rz	9,54	µm
8: Ra	2,04	µm
8: Rmax	10,83	µm
8: Rz	9,42	µm
9: Ra	1,85	µm
9: Rmax	12,16	µm
9: Rz	9,17	µm

42 1-9

1: Ra	0,84	µm
1: Rmax	3,73	µm
1: Rz	3,53	µm
2: Ra	0,85	µm
2: Rmax	4,66	µm
2: Rz	4,46	µm
3: Ra	1,51	µm
3: Rmax	6,11	µm
3: Rz	5,84	µm
4: Ra	1,80	µm
4: Rmax	7,25	µm
4: Rz	7,08	µm
5: Ra	1,98	µm
5: Rmax	8,88	µm
5: Rz	8,31	µm
6: Ra	2,03	µm
6: Rmax	10,66	µm
6: Rz	9,37	µm
7: Ra	2,11	µm
7: Rmax	11,33	µm
7: Rz	9,90	µm
8: Ra	1,92	µm
8: Rmax	12,12	µm
8: Rz	10,84	µm
9: Ra	1,75	µm
9: Rmax	12,59	µm
9: Rz	9,79	µm

531 1-9

1: Ra	0,45	µm
1: Rmax	2,40	µm
1: Rz	2,28	µm
2: Ra	0,47	µm
2: Rmax	3,09	µm
2: Rz	2,85	µm
3: Ra	0,73	µm
3: Rmax	3,73	µm
3: Rz	3,46	µm
4: Ra	1,32	µm
4: Rmax	5,28	µm
4: Rz	4,91	µm
5: Ra	1,45	µm
5: Rmax	6,60	µm
5: Rz	6,25	µm
6: Ra	1,28	µm
6: Rmax	6,22	µm
6: Rz	5,64	µm
7: Ra	1,08	µm
7: Rmax	4,74	µm
7: Rz	4,58	µm
8: Ra	0,95	µm
8: Rmax	5,11	µm
8: Rz	4,25	µm
9: Ra	0,98	µm
9: Rmax	5,36	µm
9: Rz	4,27	µm

21 008

1: Ra	0,36	µm
1: Rmax	1,83	µm
1: Rz	1,71	µm
2: Ra	0,69	µm
2: Rmax	3,01	µm
2: Rz	2,91	µm
3: Ra	0,73	µm
3: Rmax	3,02	µm
3: Rz	3,01	µm
4: Ra	0,67	µm
4: Rmax	3,01	µm
4: Rz	2,97	µm
5: Ra	0,50	µm
5: Rmax	2,68	µm
5: Rz	2,50	µm
6: Ra	0,42	µm
6: Rmax	2,14	µm
6: Rz	1,97	µm
7: Ra	0,62	µm
7: Rmax	2,75	µm
7: Rz	2,61	µm
8: Ra	0,59	µm
8: Rmax	2,48	µm
8: Rz	2,43	µm
9: Ra	0,54	µm
9: Rmax	2,68	µm
9: Rz	2,56	µm

Probe 21 1-9 Rz,Pt

1: Rz	2,07	µm
1: Pt	3,15	µm
2: Rz	2,65	µm
2: Pt	4,97	µm
3: Rz	2,91	µm
3: Pt	6,28	µm
4: Rz	3,82	µm
4: Pt	10,08	µm
5: Rz	4,96	µm
5: Pt	12,63	µm
6: Rz	5,03	µm
6: Pt	13,54	µm
7: Rz	5,06	µm
7: Pt	15,57	µm
8: Rz	4,55	µm
8: Pt	19,86	µm
9: Rz	5,26	µm
9: Pt	20,41	µm
Σ Rz	4,04	µm
S Rz	1,14	µm
Min Rz	2,07	µm
Max Rz	5,26	µm
R Rz	3,18	µm
Σ Pt	11,83	µm
S Pt	5,89	µm
Min Pt	3,15	µm
Max Pt	20,41	µm
R Pt	17,26	µm

23-1 12x neu aufgesetzt

1: Ra	0,37	µm
1: Rmax	1,66	µm
1: Rz	1,58	µm
2: Ra	0,37	µm
2: Rmax	1,57	µm
2: Rz	1,52	µm
3: Ra	0,38	µm
3: Rmax	1,72	µm
3: Rz	1,63	µm
4: Ra	0,37	µm
4: Rmax	1,78	µm
4: Rz	1,61	µm
5: Ra	0,38	µm
5: Rmax	1,84	µm
5: Rz	1,63	µm
6: Ra	0,37	µm
6: Rmax	1,70	µm
6: Rz	1,59	µm
7: Ra	0,36	µm
7: Rmax	1,63	µm
7: Rz	1,56	µm
8: Ra	0,38	µm
8: Rmax	1,73	µm
8: Rz	1,61	µm
9: Ra	0,36	µm
9: Rmax	1,70	µm
9: Rz	1,58	µm
10: Ra	0,36	µm
10: Rmax	1,83	µm
10: Rz	1,63	µm
11: Ra	0,36	µm
11: Rmax	1,68	µm
11: Rz	1,54	µm
12: Ra	0,37	µm
12: Rmax	1,77	µm
12: Rz	1,58	µm
X Ra	0,37	µm
S Ra	0,01	µm
Min Ra	0,36	µm
Max Ra	0,38	µm
R Ra	0,02	µm
X Rmax	1,72	µm
S Rmax	0,08	µm
Min Rmax	1,57	µm
Max Rmax	1,84	µm
R Rmax	0,26	µm
X Rz	1,59	µm
S Rz	0,03	µm
Min Rz	1,52	µm
Max Rz	1,63	µm
R Rz	0,11	µm

22-3 10x gleiche Stelle

1: Ra	0,46	µm
1: Rmax	2,55	µm
1: Rz	2,40	µm
2: Ra	0,45	µm
2: Rmax	2,50	µm
2: Rz	2,36	µm
3: Ra	0,45	µm
3: Rmax	2,48	µm
3: Rz	2,34	µm
4: Ra	0,45	µm
4: Rmax	2,54	µm
4: Rz	2,36	µm
5: Ra	0,45	µm
5: Rmax	2,53	µm
5: Rz	2,35	µm
6: Ra	0,45	µm
6: Rmax	2,52	µm
6: Rz	2,35	µm
7: Ra	0,45	µm
7: Rmax	2,50	µm
7: Rz	2,35	µm
8: Ra	0,45	µm
8: Rmax	2,48	µm
8: Rz	2,36	µm
9: Ra	0,45	µm
9: Rmax	2,45	µm
9: Rz	2,33	µm
10: Ra	0,45	µm
10: Rmax	2,44	µm
10: Rz	2,32	µm
X Ra	0,45	µm
S Ra	0,00	µm
Min Ra	0,45	µm
Max Ra	0,46	µm
R Ra	0,01	µm
X Rmax	2,50	µm
S Rmax	0,03	µm
Min Rmax	2,44	µm
Max Rmax	2,55	µm
R Rmax	0,10	µm
X Rz	2,35	µm
S Rz	0,02	µm
Min Rz	2,32	µm
Max Rz	2,40	µm
R Rz	0,09	µm

41-45 Stufe 3

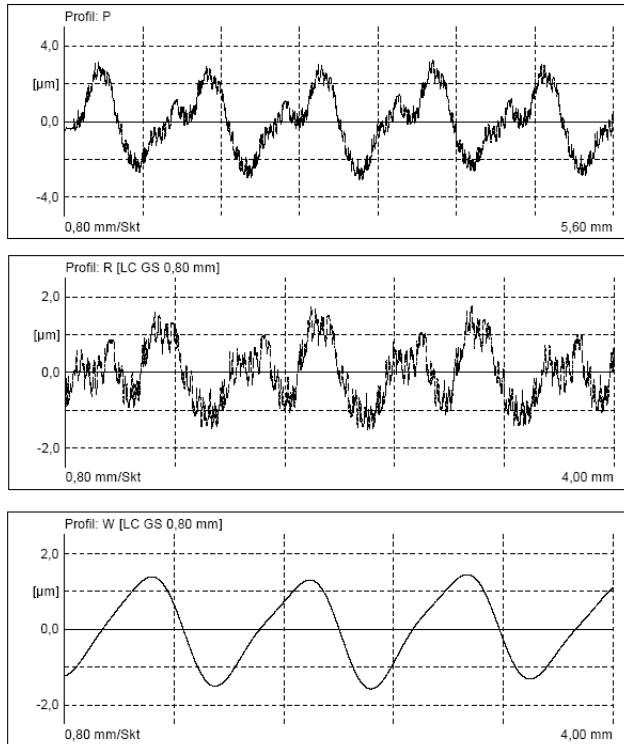
1: Ra	1,26	µm
1: Rmax	5,63	µm
1: Rz	5,45	µm
2: Ra	1,17	µm
2: Rmax	5,78	µm
2: Rz	5,39	µm
3: Ra	1,25	µm
3: Rmax	5,57	µm
3: Rz	5,40	µm
4: Ra	1,21	µm
4: Rmax	5,62	µm
4: Rz	5,44	µm
5: Ra	1,22	µm
5: Rmax	5,72	µm
5: Rz	5,57	µm
X Ra	1,22	µm
S Ra	0,03	µm
Min Ra	1,17	µm
Max Ra	1,26	µm
R Ra	0,09	µm
X Rmax	5,66	µm
S Rmax	0,08	µm
Min Rmax	5,57	µm
Max Rmax	5,78	µm
R Rmax	0,21	µm
X Rz	5,45	µm
S Rz	0,06	µm
Min Rz	5,39	µm
Max Rz	5,57	µm
R Rz	0,18	µm

21 bis 25 Stufe 3

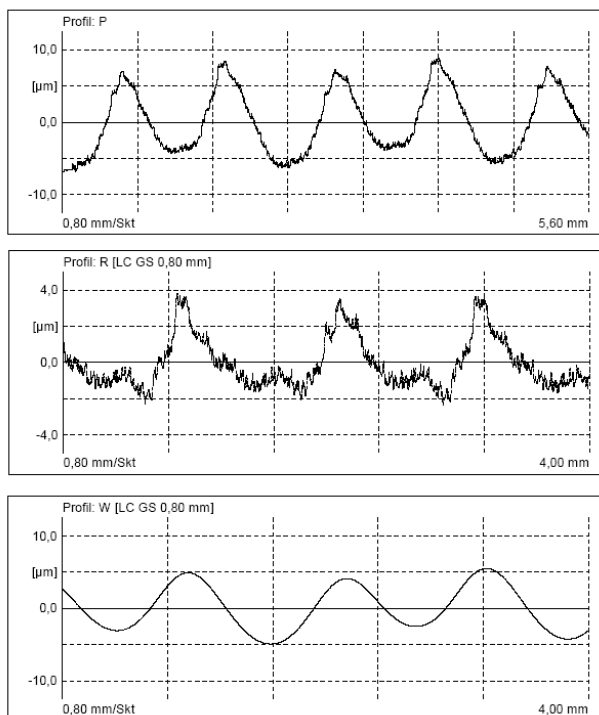
1: Ra	0,43	µm
1: Rmax	2,33	µm
1: Rz	2,16	µm
2: Ra	0,47	µm
2: Rmax	2,62	µm
2: Rz	2,40	µm
3: Ra	0,44	µm
3: Rmax	2,42	µm
3: Rz	2,28	µm
4: Ra	0,48	µm
4: Rmax	2,50	µm
4: Rz	2,35	µm
5: Ra	0,47	µm
5: Rmax	2,55	µm
5: Rz	2,43	µm
X Ra	0,46	µm
S Ra	0,02	µm
Min Ra	0,43	µm
Max Ra	0,48	µm
R Ra	0,05	µm
X Rmax	2,48	µm
S Rmax	0,10	µm
Min Rmax	2,33	µm
Max Rmax	2,62	µm
R Rmax	0,30	µm
X Rz	2,32	µm
S Rz	0,09	µm
Min Rz	2,16	µm
Max Rz	2,43	µm
R Rz	0,26	µm

Anhang 2: Oberflächenprofile Kufen-Tastsystem

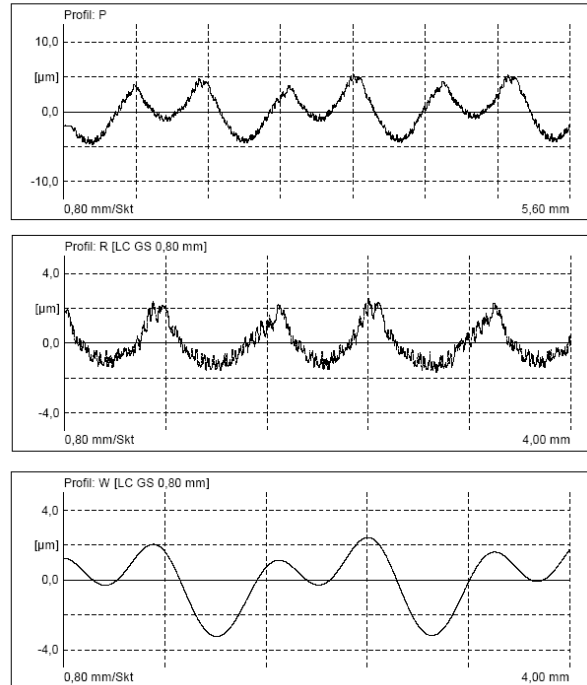
Analyse 22-3



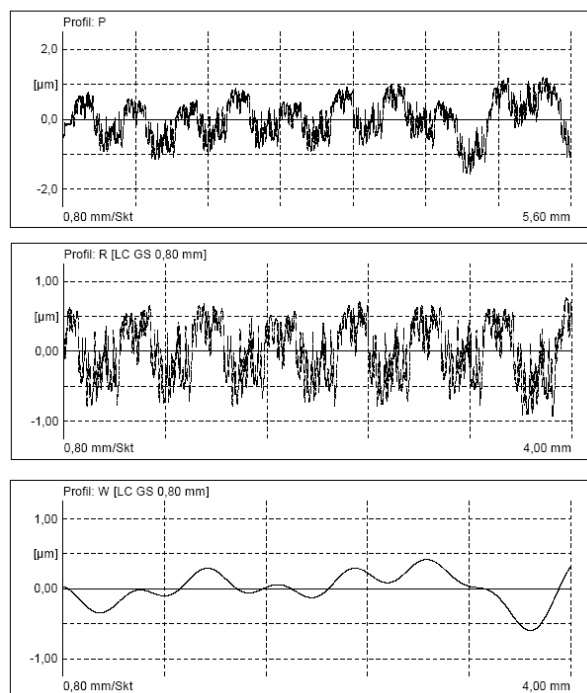
Analyse 22-7



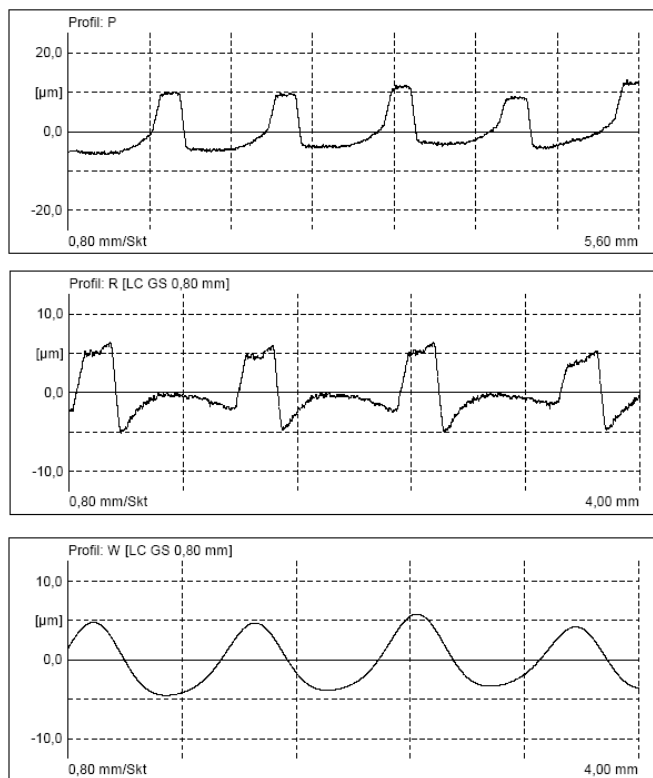
Analyse 22-5



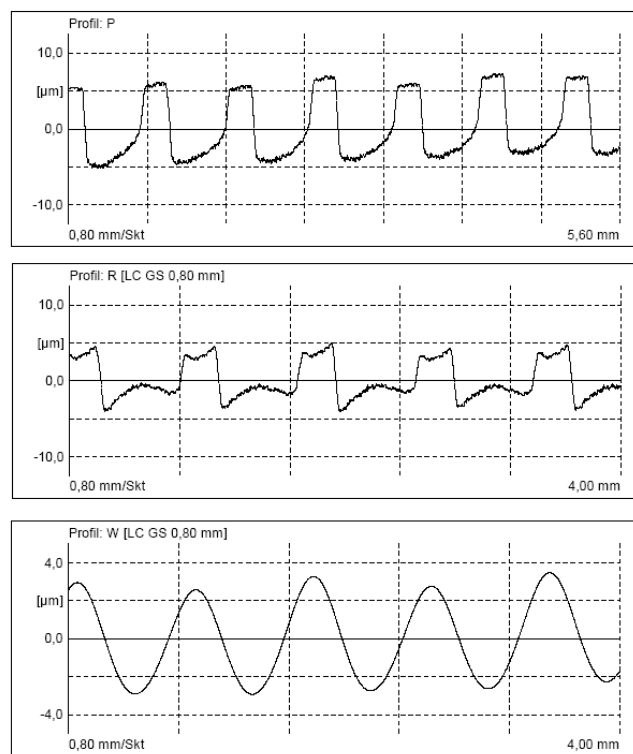
Analyse 23-1



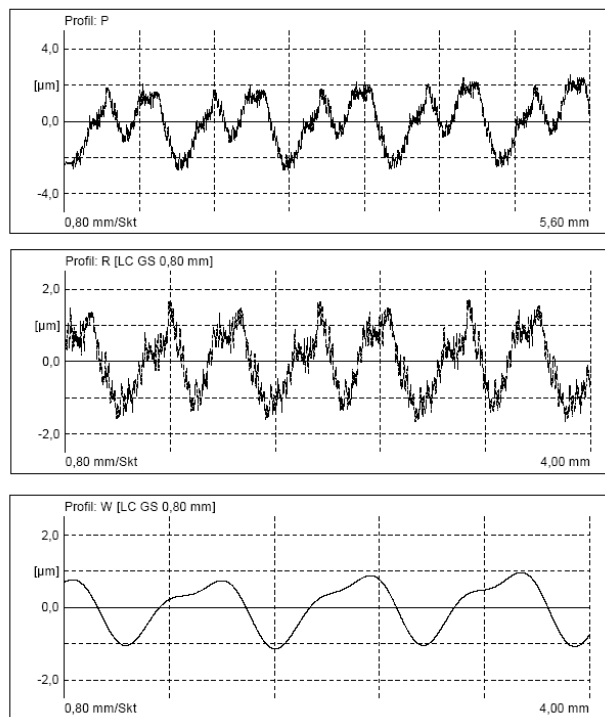
Analyse 42-7



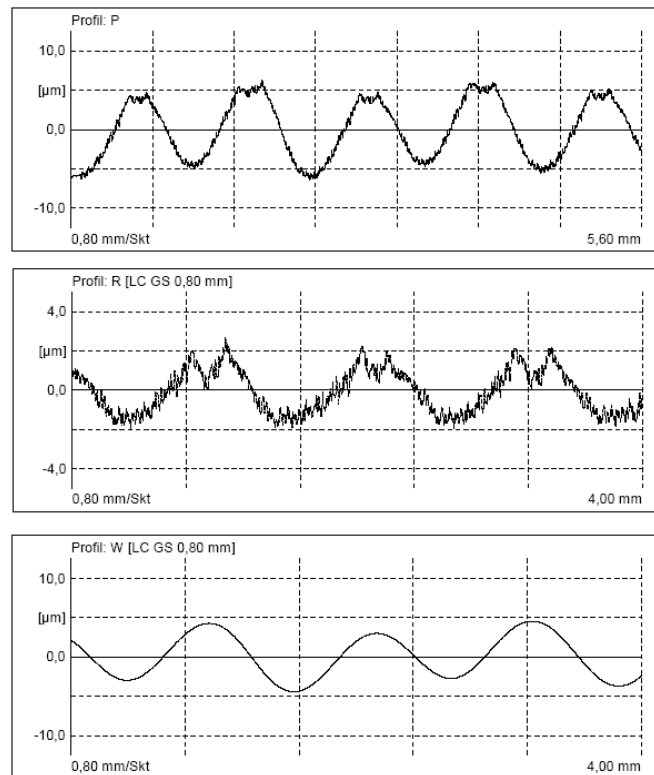
Analyse 42-5



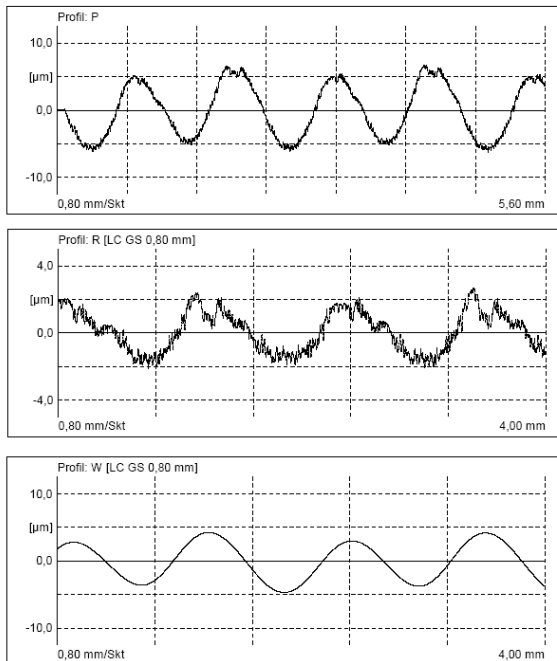
Analyse 003-3



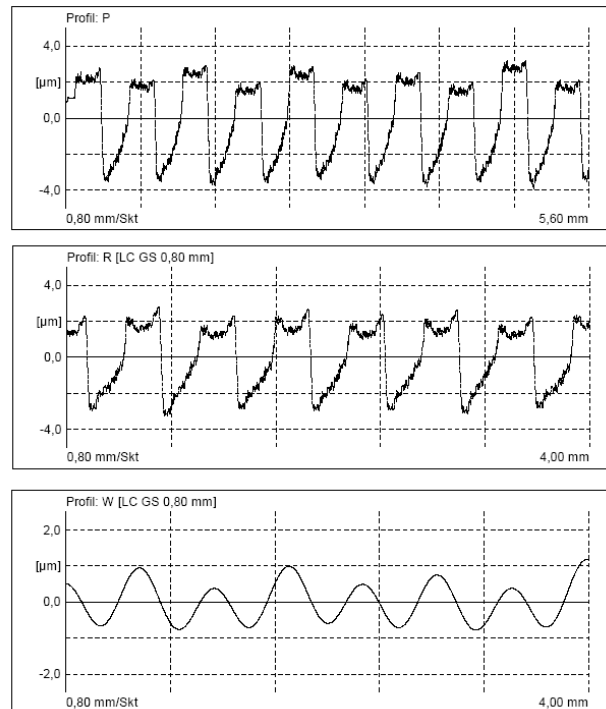
Analyse 003-7



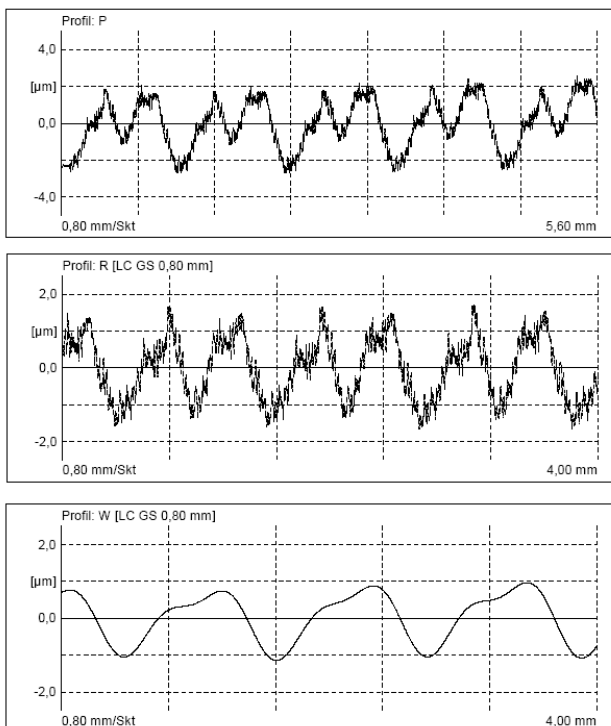
Analyse 004-7



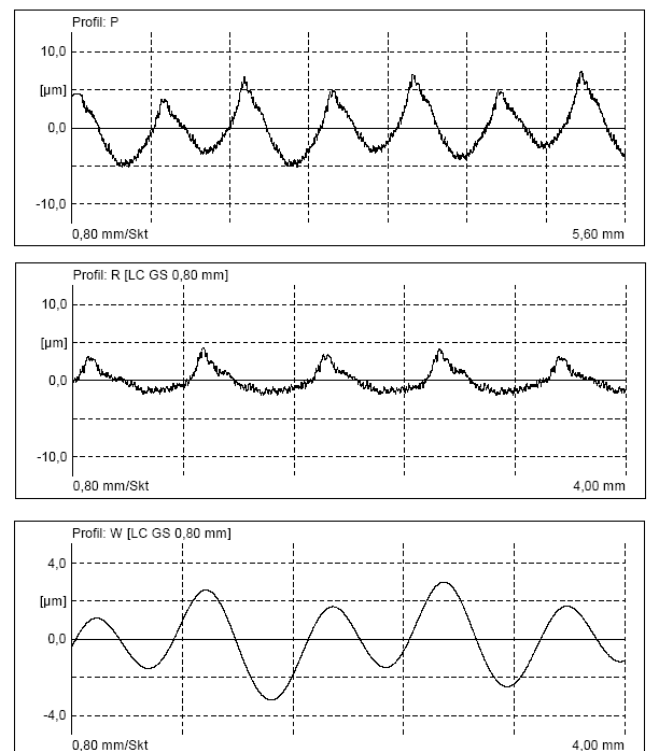
Analyse 42-3

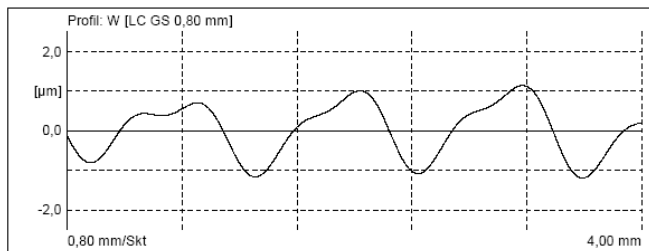
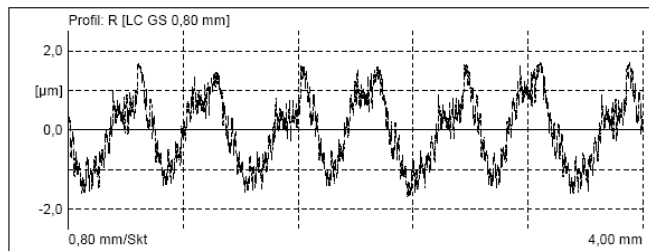
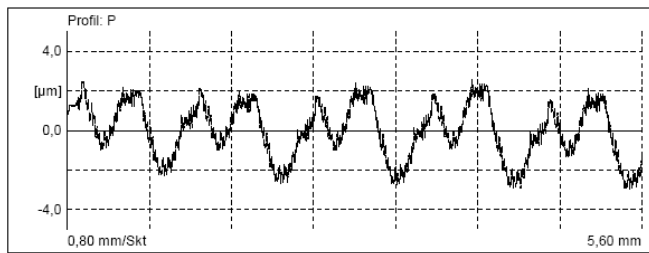


Analyse 003-5

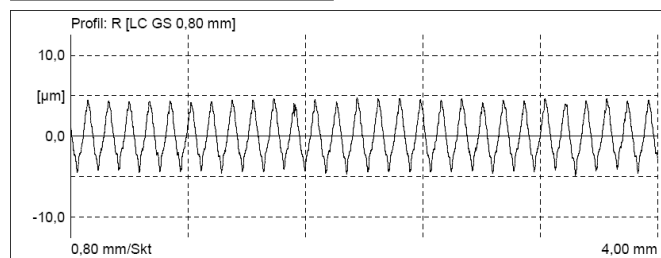


Analyse 004-5



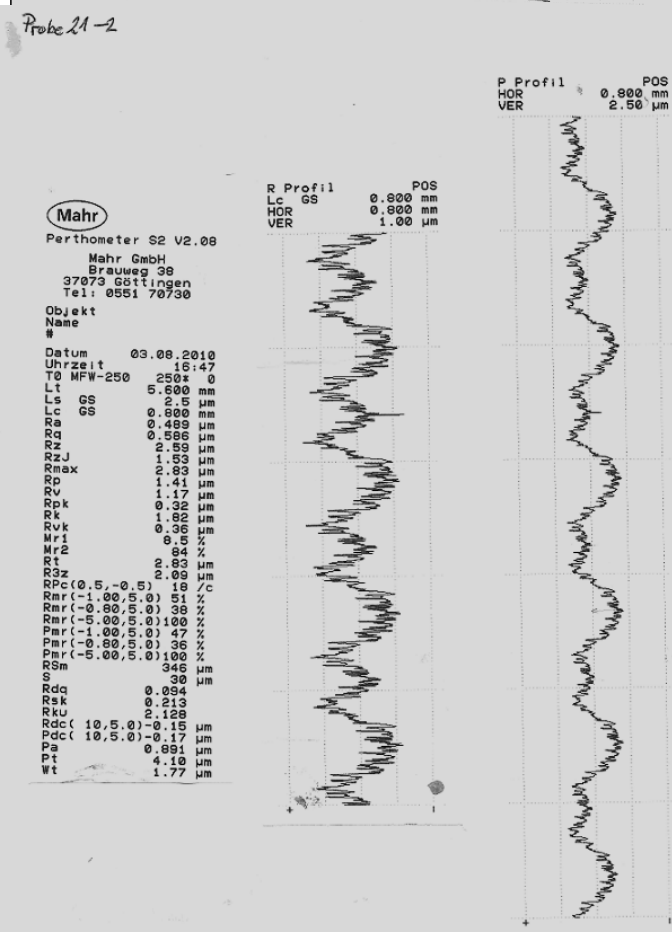
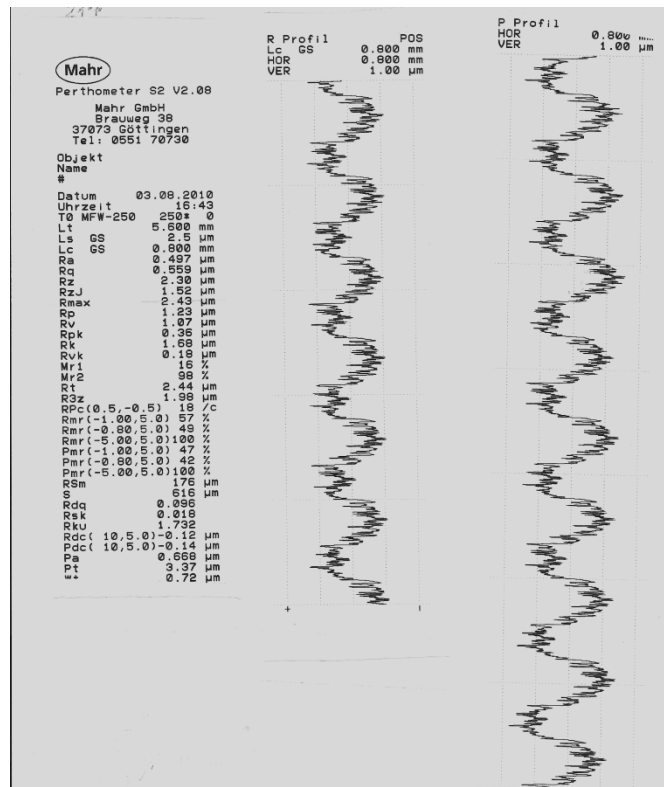


Ra	2,23	μm
Rmax	9,45	μm
Rz	9,23	μm



Anhang 3: Oberflächenmesswerte Bezugsebenen-Tastsystem

Probe 21



Probe 21-6

(Mahr)

Perthometer S2 V2.08

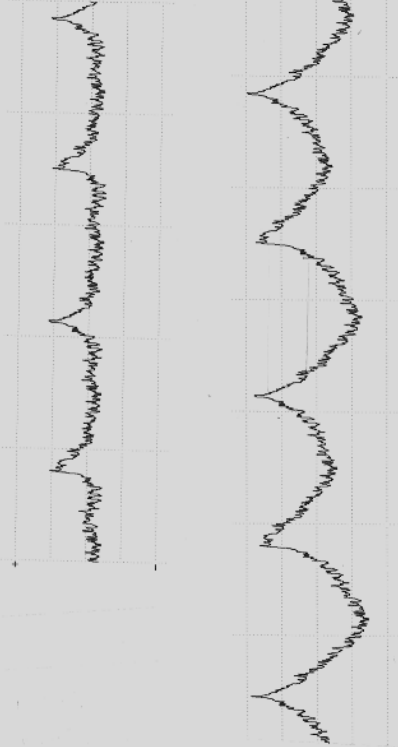
Mahr GmbH
Brauweg 38
37075 Göttingen
Tel: 0551 70730

Objekt 21-6

Name #
Datum 03.08.2010
Uhrzeit 16:53
T0 MFW-250 250* 0
Lt 5.500 mm
Ls GS 2.5 µm
Lc GS 0.800 mm
Ra 0.560 µm
Rq 0.767 µm
Rz 3.54 µm
RzJ 1.86 µm
Rmax 3.94 µm
Rp 2.51 µm
Rv 1.03 µm
Rpk 1.90 µm
Rk 1.37 µm
Rvk 0.23 µm
Mr1 21 %
Mr2 94 %
Rt 4.09 µm
R3z 2.21 µm
RPC(0.5,-0.5) 13 /c
Rmr(-1.00,5.0) 14 %
Rmr(-0.80,5.0) 11 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 13 %
Pmr(-0.80,5.0) 11 %
Pmr(-5.00,5.0) 78 %
RSm 244 µm
S 79 µm
Rdq 0.100 µm
Rsk 1.516 µm
Rku 4.875 µm
Rdc(10,5.0) -0.59 µm
Pdc(10,5.0) -0.70 µm
Pa 1.497 µm
Pt 8.54 µm
Wt

R Profil
Lc GS 0.800 mm
HOR 0.800 mm
VER 2.50 µm

P
Hux
VER 2.50 µm



Probe 21-3 bis 21-8

21-3

Ra 0.554 µm
Rq 0.673 µm
Rz 2.95 µm
RzJ 1.59 µm
Rmax 3.15 µm
Rp 1.91 µm
Rv 1.05 µm
Rpk 0.79 µm
Rk 2.08 µm
Rvk 0.18 µm
Mr1 14 %
Mr2 96 %
Rt 3.24 µm
R3z 2.37 µm
RPC(0.5,-0.5) 18 /c
Rmr(-1.00,5.0) 31 %
Rmr(-0.80,5.0) 23 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 27 %
Pmr(-0.80,5.0) 21 %
Pmr(-5.00,5.0) 100 %
RSm 265 µm
S 27 µm
Rdq 0.094 µm
Rsk 0.693 µm
Rku 2.697 µm
Rdc(10,5.0) -0.26 µm
Pdc(10,5.0) -0.27 µm
Pa 1.009 µm
Pt 5.17 µm
Wt 2.31 µm

21-4

Ra 0.568 µm
Rq 0.681 µm
Rz 3.09 µm
RzJ 1.71 µm
Rmax 3.32 µm
Rp 2.00 µm
Rv 1.09 µm
Rpk 0.91 µm
Rk 1.94 µm
Rvk 0.17 µm
Mr1 20 %
Mr2 97 %
Rt 3.50 µm
R3z 2.33 µm
RPC(0.5,-0.5) 13 /c
Rmr(-1.00,5.0) 29 %
Rmr(-0.80,5.0) 24 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 24 %
Pmr(-0.80,5.0) 20 %
Pmr(-5.00,5.0) 100 %
RSm 281 µm
S 23 µm
Rdq 0.098 µm
Rsk 0.677 µm
Rku 2.604 µm
Rdc(10,5.0) -0.22 µm
Pdc(10,5.0) -0.31 µm
Pa 1.149 µm
Pt 6.42 µm
Wt 2.72 µm

21-5

Ra 0.559 µm
Rq 0.734 µm
Rz 3.34 µm
RzJ 1.71 µm
Rmax 3.62 µm
Rp 2.27 µm
Rv 1.07 µm
Rpk 1.36 µm
Rk 1.91 µm
Rvk 0.17 µm
Mr1 17 %
Mr2 98 %
Rt 3.81 µm
R3z 2.61 µm
RPC(0.5,-0.5) 15 /c
Rmr(-1.00,5.0) 18 %
Rmr(-0.80,5.0) 14 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 15 %
Pmr(-0.80,5.0) 12 %
Pmr(-5.00,5.0) 88 %
RSm 242 µm
S 28 µm
Rdq 0.099 µm
Rsk 1.185 µm
Rku 3.728 µm
Rdc(10,5.0) -0.46 µm
Pdc(10,5.0) -0.55 µm
Pa 1.352 µm
Pt 7.53 µm
Wt 4.10 µm

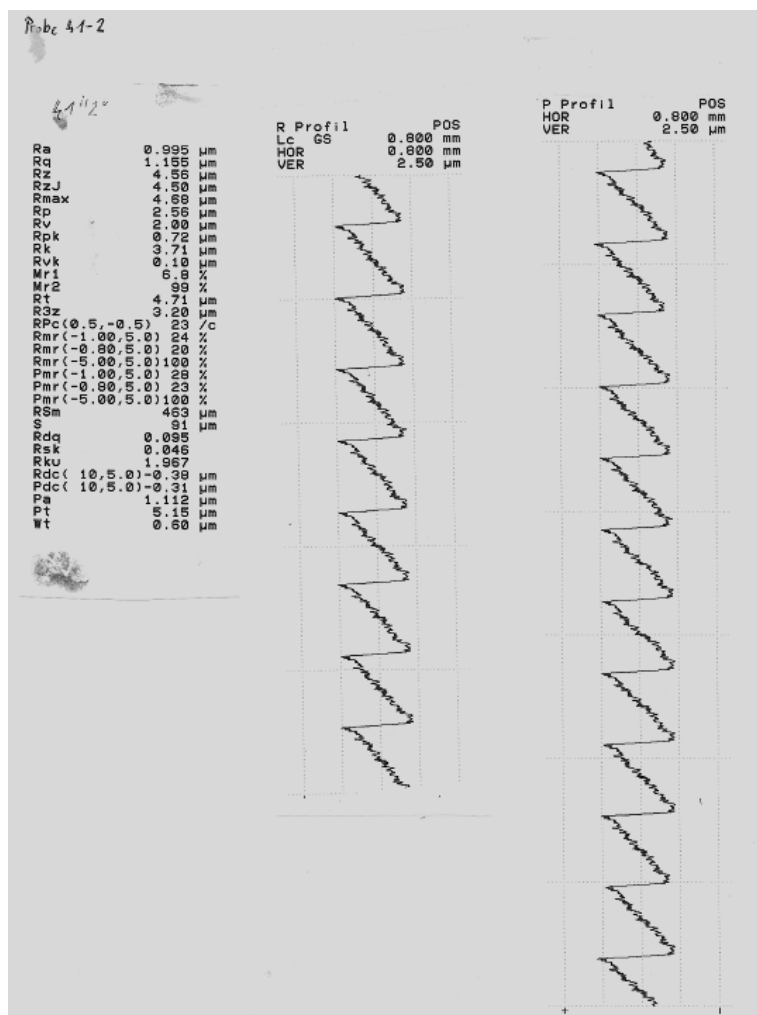
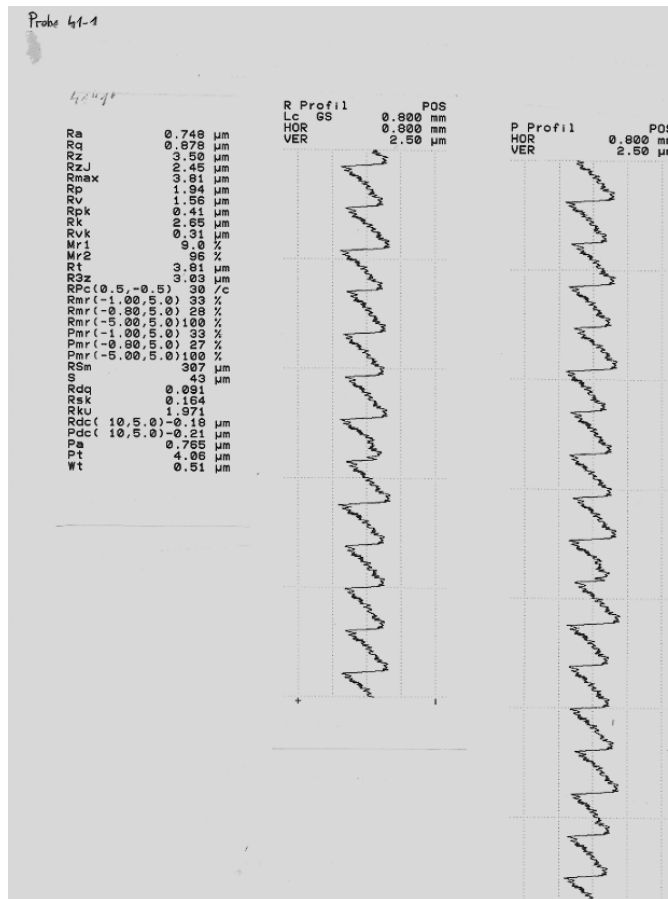
21-7

Ra 0.576 µm
Rq 0.802 µm
Rz 3.36 µm
RzJ 1.56 µm
Rmax 4.28 µm
Rp 2.24 µm
Rv 1.12 µm
Rpk 2.22 µm
Rk 1.20 µm
Rvk 0.31 µm
Mr1 20 %
Mr2 94 %
Rt 4.48 µm
R3z 2.44 µm
RPC(0.5,-0.5) 15 /c
Rmr(-1.00,5.0) 12 %
Rmr(-0.80,5.0) 11 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 12 %
Pmr(-0.80,5.0) 11 %
Pmr(-5.00,5.0) 51 %
RSm 206 µm
S 105 µm
Rdq 0.100 µm
Rsk 1.589 µm
Rku 5.384 µm
Rdc(10,5.0) -0.57 µm
Pdc(10,5.0) -0.69 µm
Pa 1.706 µm
Pt 9.54 µm
Wt

21-8

Ra 0.562 µm
Rq 0.918 µm
Rz 4.06 µm
RzJ 1.91 µm
Rmax 5.15 µm
Rp 2.77 µm
Rv 1.28 µm
Rpk 2.54 µm
Rk 1.30 µm
Rvk 0.43 µm
Mr1 21 %
Mr2 94 %
Rt 5.17 µm
R3z 2.90 µm
RPC(0.5,-0.5) 18 /c
Rmr(-1.00,5.0) 11 %
Rmr(-0.80,5.0) 10 %
Rmr(-5.00,5.0) 100 %
Pmr(-1.00,5.0) 10 %
Pmr(-0.80,5.0) 9.4 %
Pmr(-5.00,5.0) 40 %
RSm 257 µm
S 113 µm
Rdq 0.099 µm
Rsk 1.646 µm
Rku 5.280 µm
Rdc(10,5.0) -0.78 µm
Pdc(10,5.0) -0.91 µm
Pa 2.026 µm
Pt 11.3 µm
Wt

Probe 41



Probe 41-6

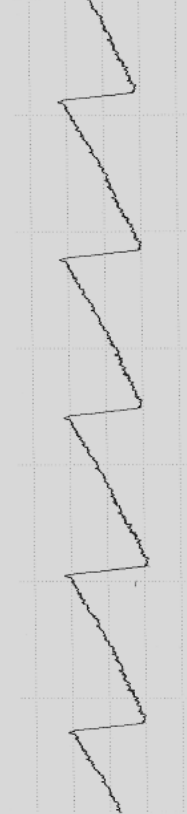
41°6'

Ra	1.018 μ m
Rq	1.641 μ m
Rz	7.63 μ m
RzJ	9.71 μ m
Rmax	9.99 μ m
Rp	4.32 μ m
Rv	3.31 μ m
Rpk	2.65 μ m
Rk	1.31 μ m
Rvk	4.21 μ m
Mr1	20 %
Mr2	75 %
Rt	9.99 μ m
R3z	***** μ m
RPc(0.5,-0.5)	10 /c
Rmr(-1.00,5.0)	10.5 %
Rmr(-0.80,5.0)	17.9 %
Rmr(-5.00,5.0)	89 %
Pmr(-1.00,5.0)	14 %
Pmr(-0.80,5.0)	52 %
Pmr(-5.00,5.0)	49 %
RSm	1082 μ m
S	361 μ m
Rdq	0.085 μ m
Rsk	0.201 μ m
Rku	4.760 μ m
Rdc(10,5.0)	-1.27 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.55 μ m
Pa	2.550 μ m
Pt	11.8 μ m
Wt	5.68 μ m

R Profil POS
LC GS 0.800 mm
HOR 0.800 mm
VER 5.00 μ m



P Profil POS
HOR 0.800 mm
VER 5.00 μ m



Probe 41-3 - 41-8

41°36'

Ra	1.133 μ m
Rq	1.402 μ m
Rz	5.69 μ m
RzJ	5.37 μ m
Rmax	5.84 μ m
Rp	3.10 μ m
Rv	2.59 μ m
Rpk	0.66 μ m
Rk	4.27 μ m
Rvk	0.78 μ m
Mr1	9.1 %
Mr2	88 %
Rt	5.84 μ m
R3z	2.12 μ m
RPc(0.5,-0.5)	15 /c
Rmr(-1.00,5.0)	16 %
Rmr(-0.80,5.0)	12 %
Rmr(-5.00,5.0)	100 %
Pmr(-1.00,5.0)	20 %
Pmr(-0.80,5.0)	15 %
Pmr(-5.00,5.0)	90 %
RSm	618 μ m
S	161 μ m
Rdq	0.092 μ m
Rsk	0.125 μ m
Rku	2.340 μ m
Rdc(10,5.0)	-0.31 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.46 μ m
Pa	1.450 μ m
Pt	6.46 μ m
Wt	5.46 μ m

41°40'

Ra	1.075 μ m
Rq	1.480 μ m
Rz	6.86 μ m
RzJ	6.86 μ m
Rmax	7.03 μ m
Rp	3.71 μ m
Rv	3.15 μ m
Rpk	1.79 μ m
Rk	2.41 μ m
Rvk	2.59 μ m
Mr1	16 %
Mr2	73 %
Rt	7.04 μ m
R3z	0.78 μ m
RPc(0.5,-0.5)	13 /c
Rmr(-1.00,5.0)	13 %
Rmr(-0.80,5.0)	12 %
Rmr(-5.00,5.0)	91 %
Pmr(-1.00,5.0)	16 %
Pmr(-0.80,5.0)	14 %
Pmr(-5.00,5.0)	72 %
RSm	774 μ m
S	318 μ m
Rdq	0.089 μ m
Rsk	0.140 μ m
Rku	3.013 μ m
Rdc(10,5.0)	-0.94 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.33 μ m
Pa	1.794 μ m
Pt	7.99 μ m
Wt	2.62 μ m

41°50'

Ra	1.082 μ m
Rq	1.519 μ m
Rz	7.34 μ m
RzJ	8.05 μ m
Rmax	8.45 μ m
Rp	3.93 μ m
Rv	3.41 μ m
Rpk	2.71 μ m
Rk	1.68 μ m
Rvk	3.75 μ m
Mr1	19 %
Mr2	74 %
Rt	8.45 μ m
R3z	***** μ m
RPc(0.5,-0.5)	10 /c
Rmr(-1.00,5.0)	10 %
Rmr(-0.80,5.0)	8.5 %
Rmr(-5.00,5.0)	87 %
Pmr(-1.00,5.0)	15 %
Pmr(-0.80,5.0)	13 %
Pmr(-5.00,5.0)	55 %
RSm	928 μ m
S	309 μ m
Rdq	0.088 μ m
Rsk	0.241 μ m
Rku	3.703 μ m
Rdc(10,5.0)	-0.95 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.56 μ m
Pa	2.251 μ m
Pt	9.92 μ m
Wt	4.15 μ m

41°34'

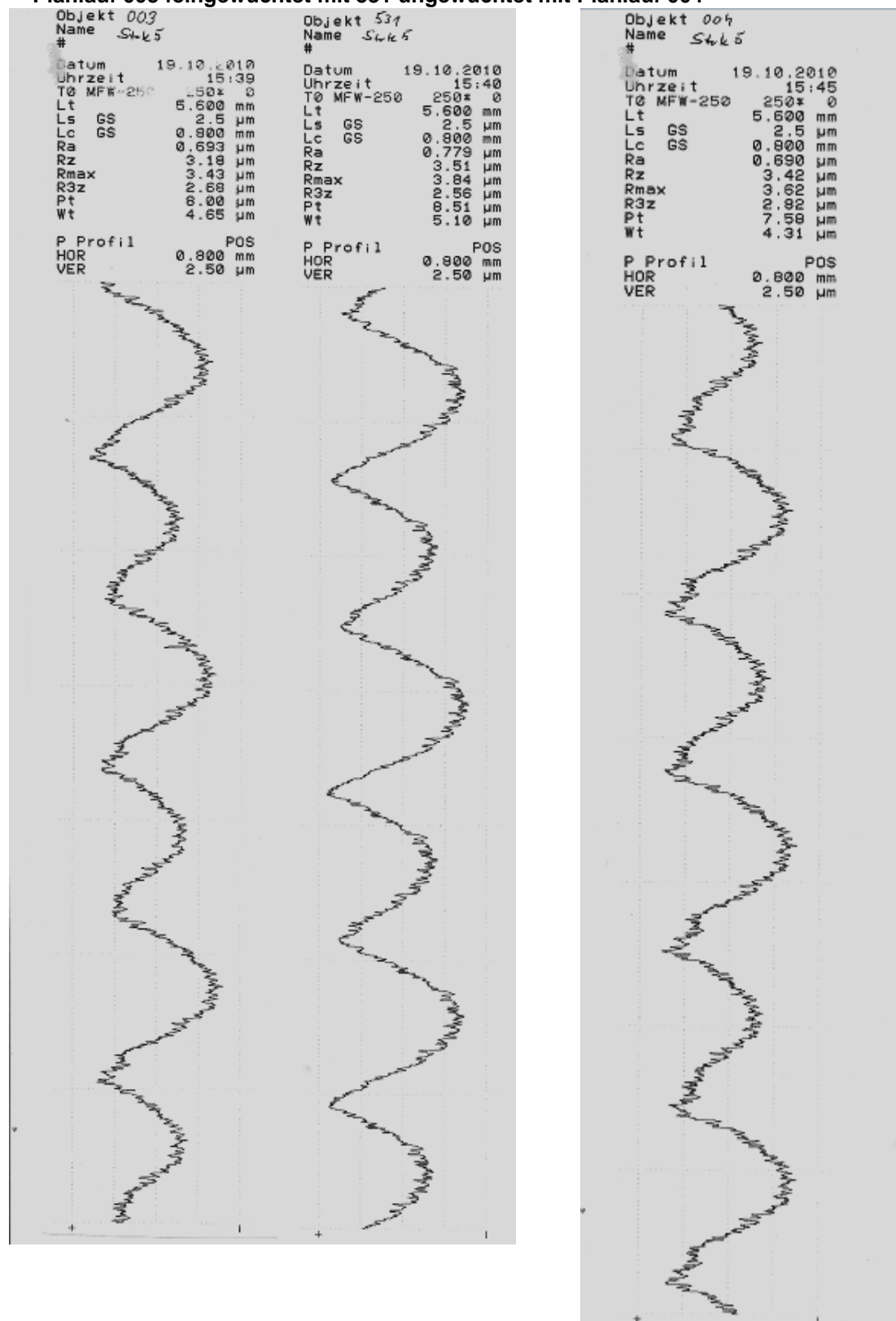
Ra	1.186 μ m
Rq	1.891 μ m
Rz	9.19 μ m
RzJ	10.1 μ m
Rmax	10.4 μ m
Rp	4.25 μ m
Rv	3.94 μ m
Rpk	3.10 μ m
Rk	1.47 μ m
Rvk	5.06 μ m
Mr1	21 %
Mr2	77 %
Rt	10.4 μ m
R3z	***** μ m
RPc(0.5,-0.5)	7.5 /c
Rmr(-1.00,5.0)	8.7 %
Rmr(-0.80,5.0)	8.4 %
Rmr(-5.00,5.0)	83 %
Pmr(-1.00,5.0)	12 %
Pmr(-0.80,5.0)	10 %
Pmr(-5.00,5.0)	40 %
RSm	1236 μ m
S	1254 μ m
Rdq	0.089 μ m
Rsk	0.335 μ m
Rku	4.205 μ m
Rdc(10,5.0)	-1.45 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.72 μ m
Pa	2.968 μ m
Pt	12.7 μ m
Wt	7.49 μ m

41°48'

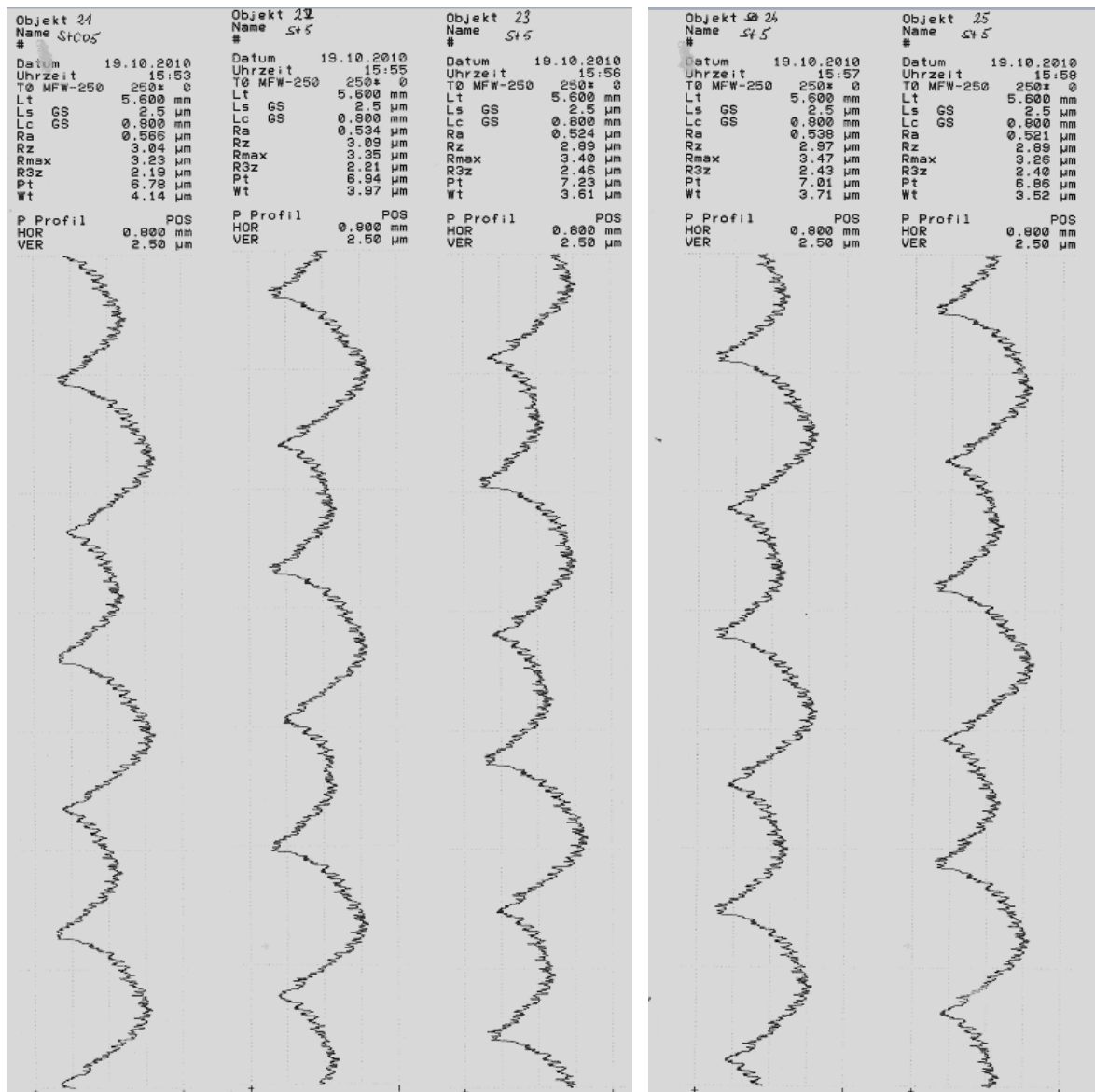
Ra	1.140 μ m
Rq	1.907 μ m
Rz	8.11 μ m
RzJ	9.72 μ m
Rmax	11.1 μ m
Rp	3.77 μ m
Rv	4.35 μ m
Rpk	3.28 μ m
Rk	1.23 μ m
Rvk	5.65 μ m
Mr1	19 %
Mr2	76 %
Rt	11.1 μ m
R3z	***** μ m
RPc(0.5,-0.5)	5.0 /c
Rmr(-1.00,5.0)	7.3 %
Rmr(-0.80,5.0)	16.9 %
Rmr(-5.00,5.0)	84 %
Pmr(-1.00,5.0)	13 %
Pmr(-0.80,5.0)	12 %
Pmr(-5.00,5.0)	42 %
RSm	1460 μ m
S	1391 μ m
Rdq	0.089 μ m
Rsk	0.026 μ m
Rku	4.770 μ m
Rdc(10,5.0)	-1.70 μ m
Pdc(10,5.0)	-0.63 μ m
Pa	3.439 μ m
Pt	13.7 μ m
Wt	13.7 μ m

Vergleich

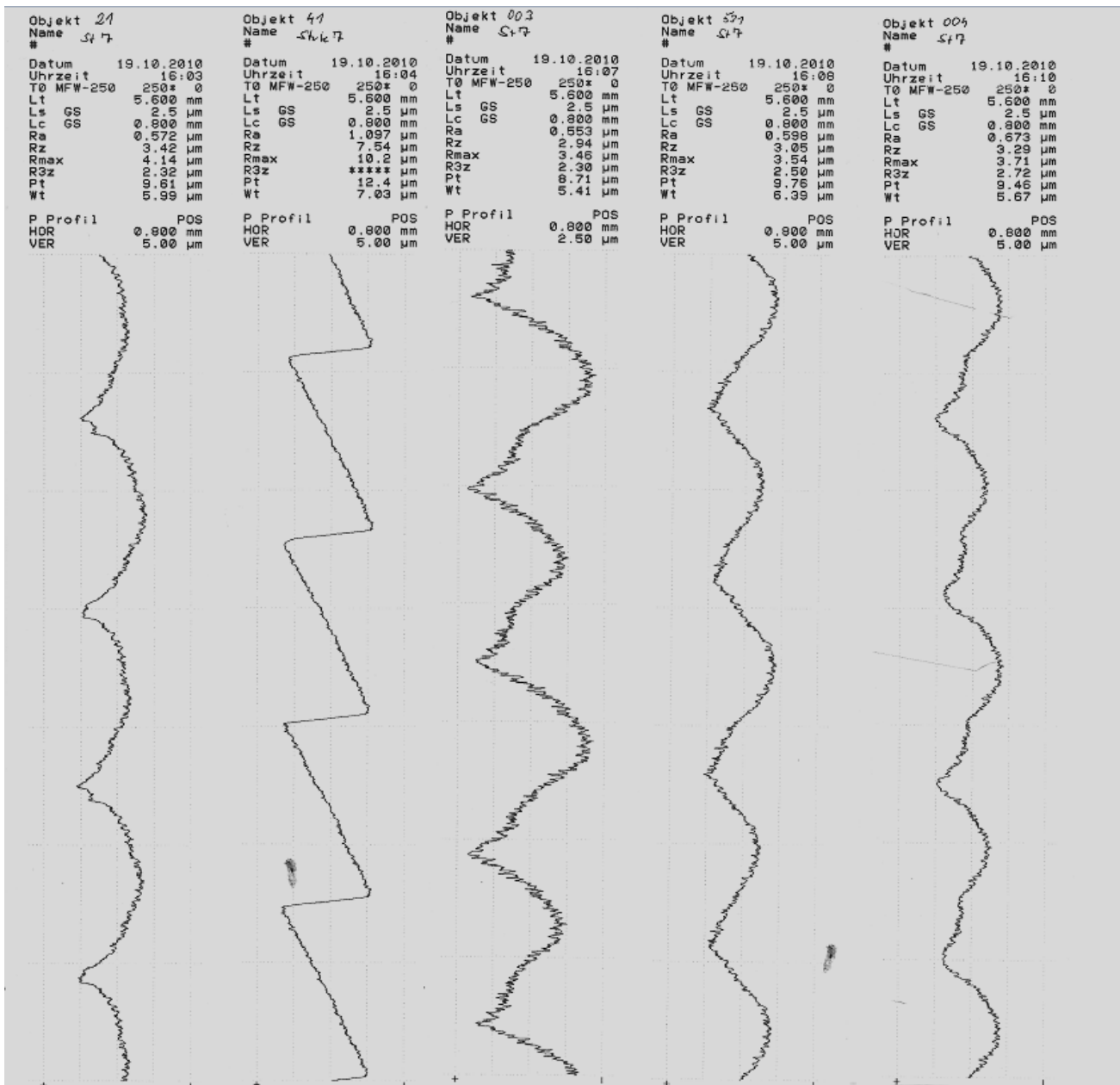
Planlauf 003 feingewuchtet mit 531 ungewuchtet mit Planlauf 004



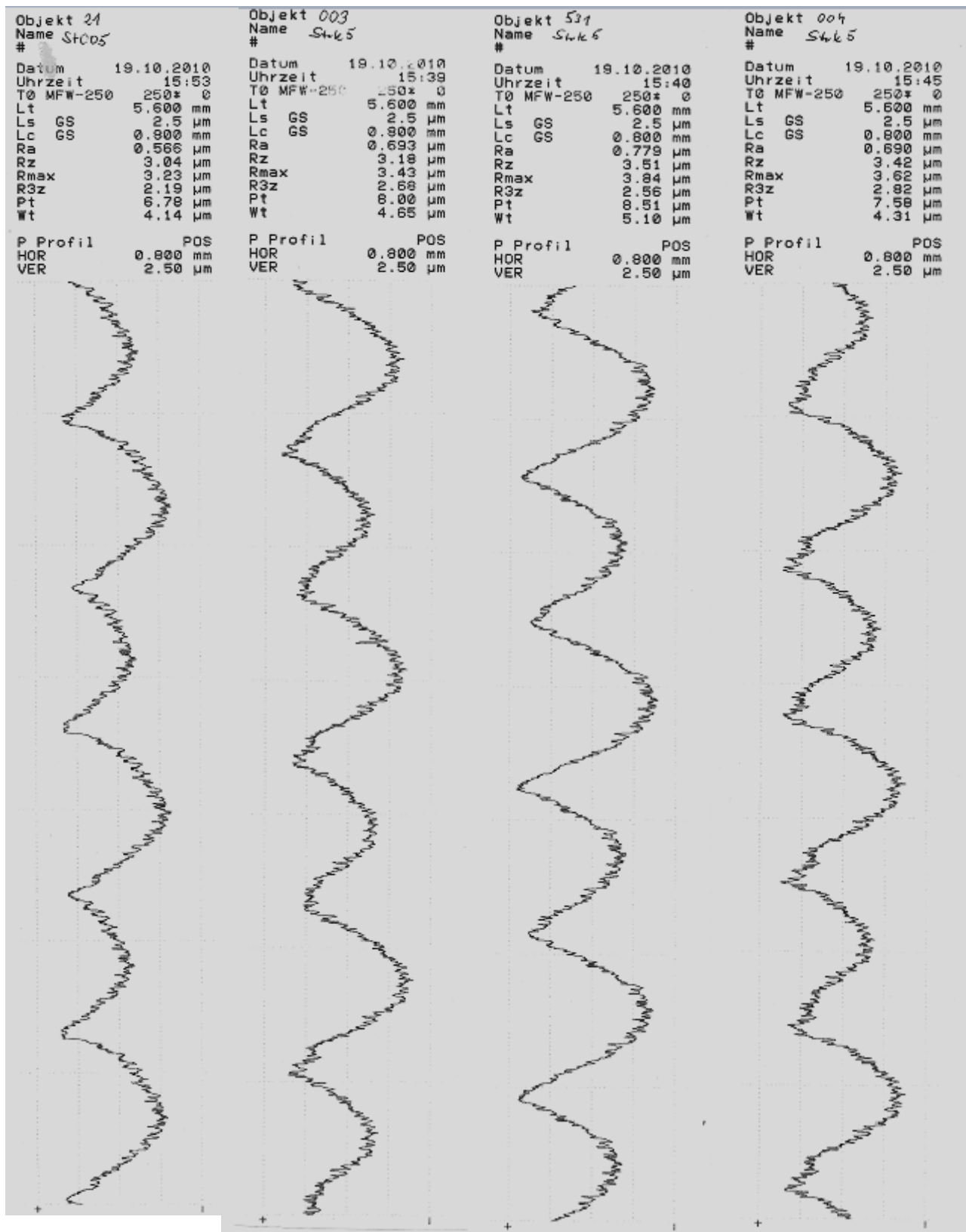
Vergleich der Stufe 5 (fz 0,15mm/Z); Probe21 bis 25



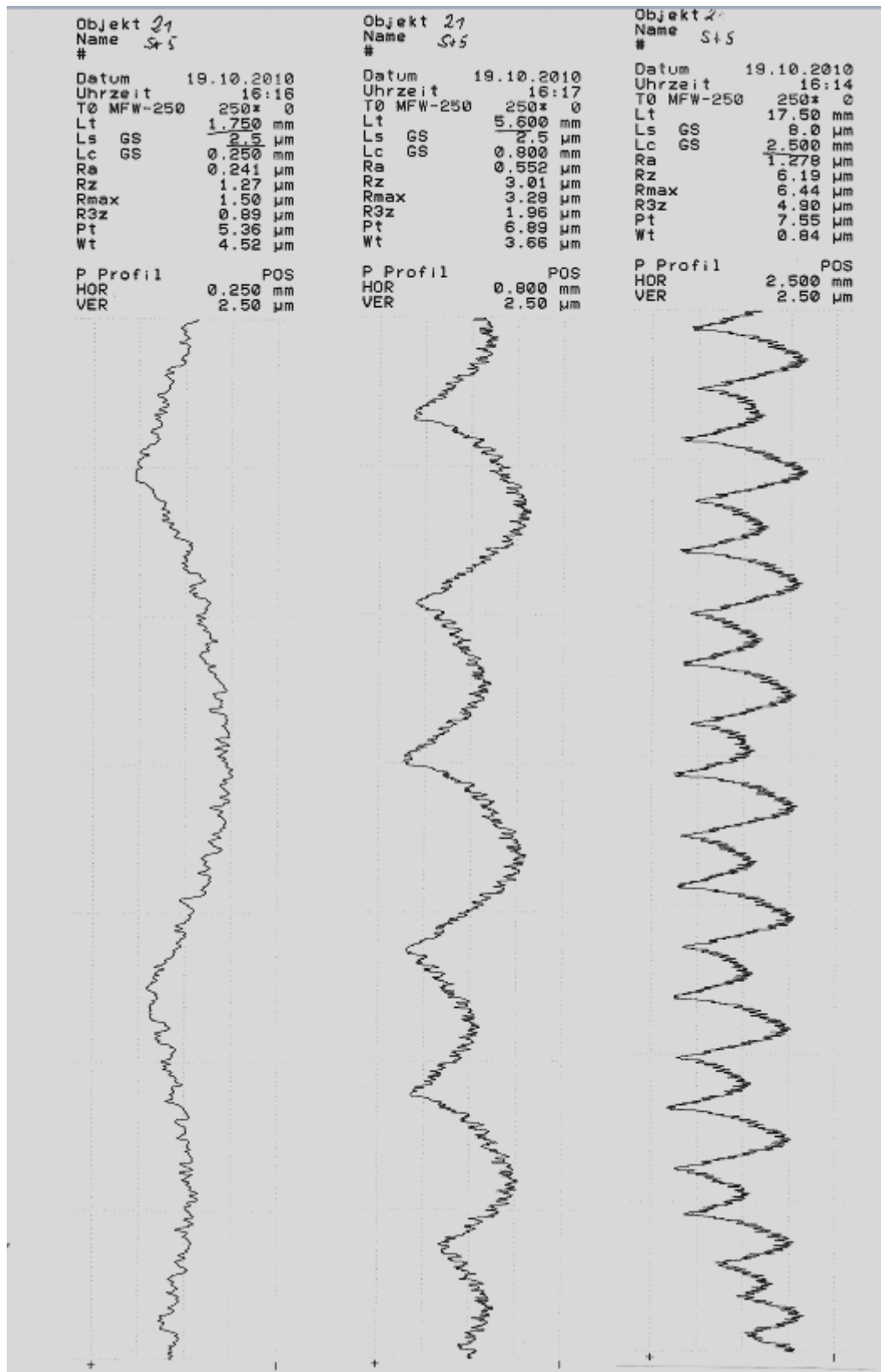
Vergleich der Stufe 7 (fz 0,2mm/Z); Probe21, 41, 003, 531, 004



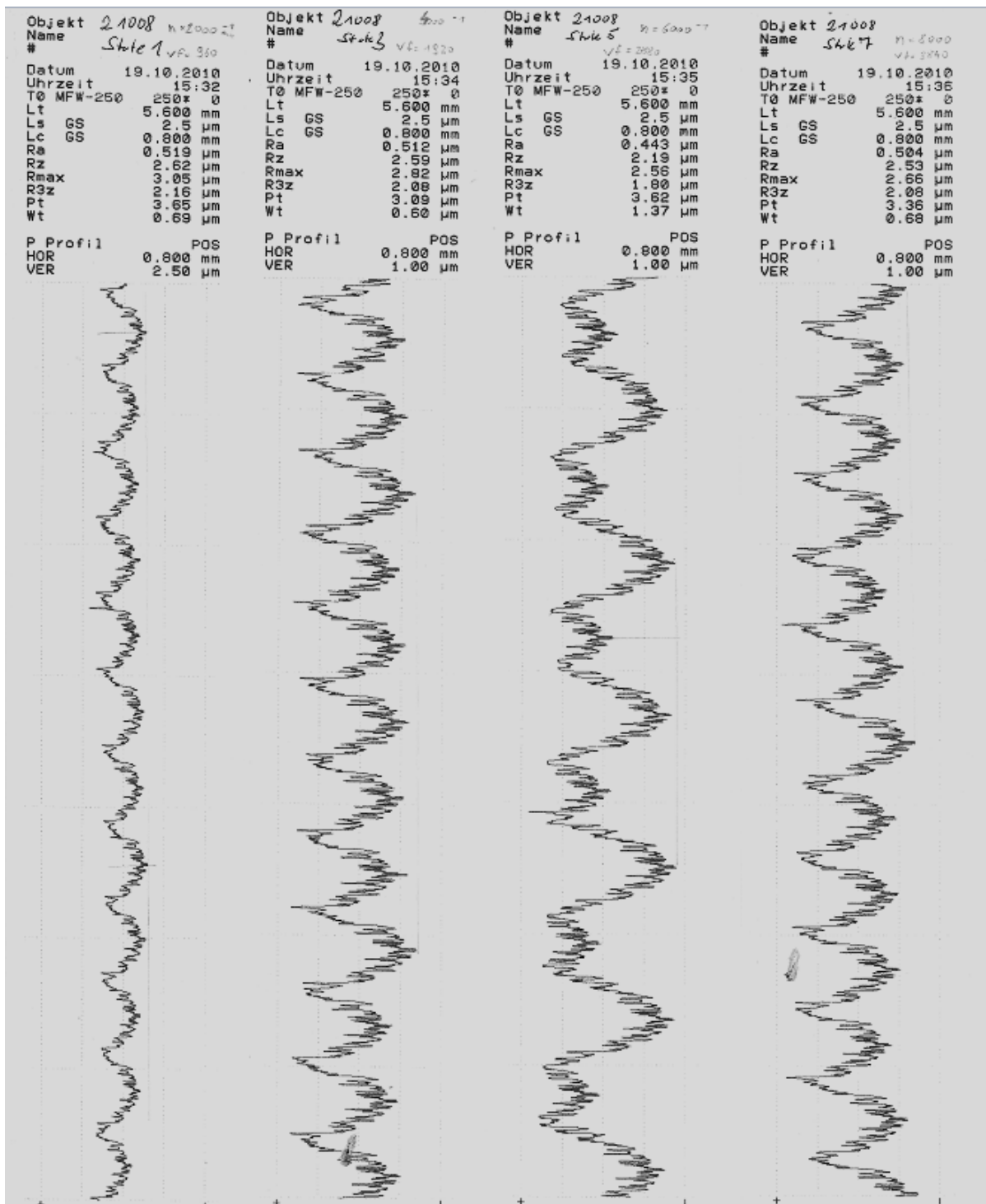
Vergleich der Stufe 5 (fz 0,15mm/Z); Probe21, 003, 531, 004



Probe 21 mit der Grenzwellenlänge 0,25mm; 0,8mm; 2,5mm

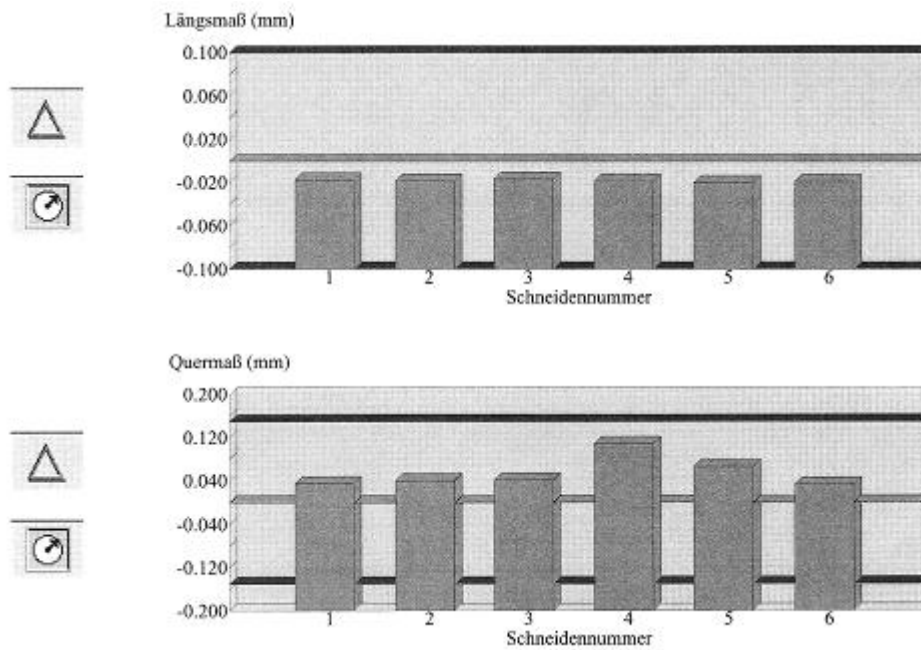


Probe 21008; gleicher Vorschub Drehzahl 2000,- 4000,- 6000,- 8000 U/min



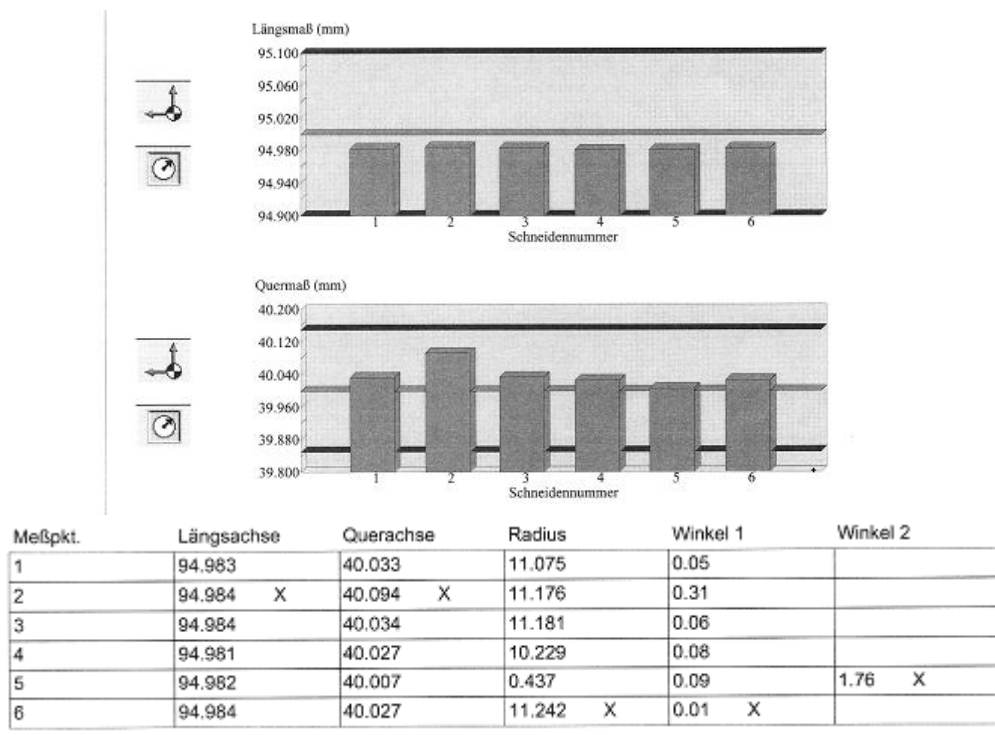
Anhang 4: Daten Werkzeugeinstellung

Einstellung 1 µm Planlauf der Schneiden (Längsmaß)

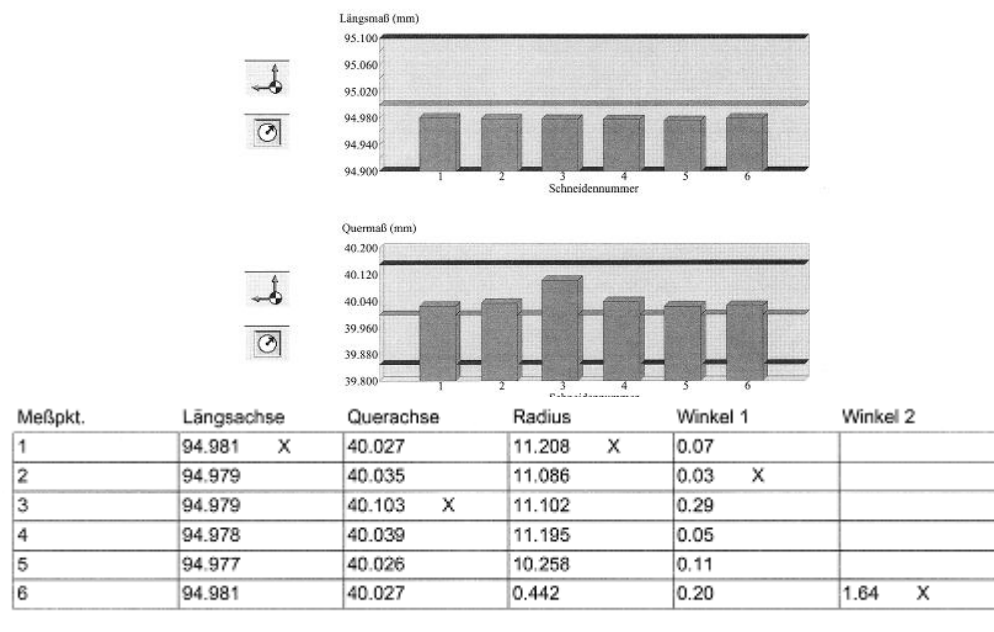


Meßwert	Stufe	SNr.	Modus	Soll	OT	UT	Ist	Tol.
Längsmaß	1	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	1	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.031	X
Radius	1	0					0.445	X
Längsmaß	2	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	2	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.025	X
Radius	2	0					11.210	X
Längsmaß	3	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.981	X
Quermaß	3	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.023	X
Radius	3	0					11.105	X
Längsmaß	4	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	4	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.110	X
Radius	4	0					11.260	X
Längsmaß	5	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.980	X
Quermaß	5	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.052	X
Radius	5	0					5.475	X
Längsmaß	6	0	RA	95.000	0.100	-0.100	94.981	X
Quermaß	6	0	RA	40.000	0.150	-0.150	40.034	X
Radius	6	0					5.370	X

Einstellung 3 µm Planlauf der Schneiden

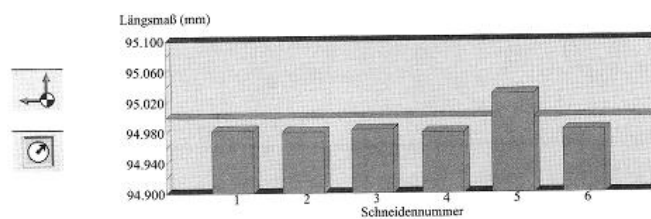


Einstellung 4 µm Planlauf der Schneiden



Einstellung Breitschlichtplatte

(Breitschlichtplatte Schneide 5)



Anhang 5: Unwuchtmessprotokoll

Wuchtqualität des Fräswerkzeuges bei der Bearbeitung der Proben⁶

HAIMER made by haimer	Tool Dynamic	Typ: TD 2002
METALL KOFLER GmbH Industriezone B14 6166 Fulpmes		

Unwuchtmessprotokoll

Datum: 01.06.10 Kunde: Mair Norbert Auftragsnummer: V021889 Bediener: Wieser Armin Rotor: A80-080-06 1	
<u>Toleranzvorgabe:</u> Wuchtgüte: G = 6,3 Betriebsdrehzahl: n = 10000 1/min Masse: M = 2.52 kg Messverfahren: 1 Ebene (statisch) Zulässige Restunwucht unten: 15.16 Messdrehzahl: 1100 1/min	

Ebene unten			
Unwucht	1.7 gmm	60.4°	gut

⁶ Außer der Probe 531

Wuchtqualität der Probe 531

HAIMER made by haimer	Tool Dynamic	Typ: TD 2002
METALL KOFLER GmbH Industriezone B14 6166 Fulpmes		

Unwuchtmessprotokoll

Datum: 01.06.10 Kunde: Mair Norbert Auftragsnummer: V021889 Bediener: Wieser Armin Rotor: A80-080-06 1	
<u>Toleranzvorgabe:</u>	
Wuchtgüte: G = 4 Betriebsdrehzahl: n = 10000 1/min Masse: M = 2.52 kg	
Messverfahren: 1 Ebene (statisch)	
Zulässige Restunwucht unten: 9.63 gmm Messdrehzahl: 1100 1/min	

Ebene unten			
Unwucht	7.4 gmm	264.0°	gut

Literaturverzeichnis

- Europa Fachbuchreihe. *Fachkunde Metall* 55. Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2007. - 568 S.
- Flores, Gerhard . „Hochschule Esslingen.“ *Messtechnik*. 2010. http://www6.hs-esslingen.de/static/326/3_Messtechnik.pdf (Zugriff am 13. September 2010).
- Garant. *Zerspanen Handbuch*. München: Garant, 2010. – 761 S.
- Jung, Dipl.-Ing. Pat.-Ing. S. „Uni-stuttgart.de.“ 2010. http://www.ima.uni-stuttgart.de/studium/dt/HFV_Oberflaechenbeurteilung_2010.pdf. (Zugriff am 31. August 2010).
- Klein. *Einführung in die DIN Norm*. 14. Auflage Stuttgart: Teubner - Beuth, 2008. - 1086S
- Krösbacher, Gerhard. *CVD-D Diamantschicht*. Innsbruck: Tiroltool, 2010. - 26S
- Lemke, Erwin. *Fertigungsmesstechnik*. 2. Verbesserte Auflage. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1992. – 232 S.
- Mahr GmbH . „Prospekt S2.“ 2006.
- Mahr GmbH. „Grundlagen der Oberflächenmesstechnik.“ *Schulungsunterlagen 9968032*. Göttingen, 2002.
- Mahr, GmbH. „Prospekt M2.“ 2004.
- Nisch, Dipl.-Ing. Susanne. *WZL/Fraunhofer IPT*. 2010. <http://www.wzl.rwth-aachen.de> (Zugriff am 03. September 2010).
- Osanna, Waczek. *Stichwort Qualität*. Wien: WUV Universitätsverlag, 1992. – 450 S
- Paucksch, Eberhard, Sven Holsten, Marco Linß, und ... *Zerspantechnik*. 12 Auflage Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008. – 458 S.
- Sander, M. *Oberflächenmesstechnik für den Praktiker*. 2. Auflage Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1993. – 121 S.
- Schneider. „Genauigkeitsangaben bei Werkzeugvoreinstellgeräten.“ Freiberg: Zoller GmbH & co.KG, 2010.
- Tabellenbuch. *Tabellenbuch Metall*. 43. Auflage Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2006.– 424 S
- Volk, Raimund. *Rauheitsmessung - Theorie und Praxis*. 1. Auflage. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin-Wien-Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2005. – 191 S.
- Witte, Horst. *Werkzeugmaschinen*. 7. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1991. – 344 S.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Fulpmes, Dezember 2010

Ing. Norbert Mair